

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

GRADO EN INGENIERÍA DE
SISTEMAS DE COMUNICACIÓN



SINCRONISMO Y BÚSQUEDA DE CELDA
EN UN SISTEMA DE CUARTA GENERACIÓN 4G (LTE)

AUTOR: Gonzalo Martín-Viveros Tello

TUTORA: Ana García Armada

20 de febrero de 2014

TÍTULO: *SINCRONISMO Y BÚSQUEDA DE CELDA EN UN SISTEMA DE CUARTA GENERACIÓN 4G (LTE).*

AUTOR: *Gonzalo Martín-Viveros Tello*

TUTORA: *Ana García Armada*

La defensa del presente Proyecto Fin de Grado se realizó el día 11 de Marzo de 2014; siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE: *MATILDE PILAR SANCHEZ FERNANDEZ*

SECRETARIO *MANUEL ALBERTO VAZQUEZ LOPEZ*

VOCAL *MARTA PORTELA GARCIA*

Habiendo obtenido la siguiente calificación:

CALIFICACIÓN:

Presidente

Secretario

Vocal

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a toda mi familia por su apoyo incondicional y ayuda durante todos estos años de estudio, ya que sin ellos nada de esto habría sido posible.

A mis grandes amigos de la Universidad como Juan, Javixu, Javi, Sergio y Rafa por haberme hecho pasar tan buenos momentos y compartir juntos tantísimas anécdotas.

A mi tutora, Ana, quien me ha dado la oportunidad de realizar este proyecto. Por su ayuda, por su preocupación y por lo que se ha involucrado a la hora de desarrollar este trabajo final de grado

Por último y la más importante, a mi novia Yasmina, ya que ha sido mi mayor apoyo durante todo este tiempo. Gracias por estar siempre ahí y hacerme sentir que puedo con cualquier cosa que me proponga. Gracias por aguantar mis días malos y siempre intentar que fueran mejores. Gracias por entender todas mis horas de estudio. Y gracias por hacerme descubrir todo el mundo de las telecomunicaciones que tanto me apasiona. Siempre estaré en deuda contigo.

Recordad todos que una parte de este proyecto os pertenece, no lo olvidéis.

*“Cuando quieras emprender algo,
habrá mucha gente que te dirá que no lo hagas
cuando vean que no te pueden detener,
te dirán cómo lo tienes que hacer,
y cuando finalmente te vean que lo has logrado,
dirán que siempre creyeron en ti”*

J. Maxwell

Resumen

Como dijo Aristóteles, *el ser humano es un ser sociable por naturaleza*, y como tal, siempre ha sentido la necesidad de comunicarse con los demás, esto, junto con el afán de superarse a sí mismo, le ha llevado a intentar buscar siempre la mejor forma para comunicarse entre sí.

En los últimos tiempos, una de las principales formas utilizadas por el ser humano para comunicarse han sido las comunicaciones móviles, gracias a lo cual, este sector se ha convertido en uno de los medios de comunicación más importantes y desarrollados tecnológicamente hablando. El actual mercado de las comunicaciones es un mercado altamente dinámico y requiere una alta adaptación y anticipación para poder cubrir las necesidades demandadas por los usuarios en cada momento. Es por este motivo por el cual, las grandes empresas de telecomunicaciones invierten una gran cantidad de dinero en desarrollar nuevas técnicas que permitan cubrir dichas necesidades. Actualmente, uno de los aspectos más importantes estudiados por las empresas de telecomunicaciones consiste en intentar minimizar el coste por bit asociado a la transmisión, es decir, intentar transmitir la máxima cantidad de datos posibles utilizando el mínimo ancho de banda, lo que se resume en intentar tener un sistema el cual posea la mayor eficiencia espectral posible.

Una de las técnicas más novedosas que permite mejorar la eficiencia espectral de los recursos radio así como conseguir unos mayores niveles de capacidad, es la conocida como Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexación ortogonal por división en frecuencia) (**OFDM**). El **OFDM** es una técnica muy utilizada actualmente en multitud de sistemas como pueden ser: la TDT (Televisión Digital Terrestre) o redes de área local inalámbricas como IEEE 802.11 a/g

(WIFI). Además, gracias a esta técnica, se han podido establecer las bases para las técnicas de acceso al medio utilizadas en los sistemas de cuarta generación [LTE](#), como son [OFDMA](#) en el enlace descendente y [SC-FDMA](#) en el enlace ascendente.

Además de las nuevas técnicas de acceso al medio [OFDMA](#) y [SC-FDMA](#) anteriormente nombradas, esta cuarta generación de telefonía móvil ha supuesto un cambio radical respecto a las anteriores generaciones, ya que en esta nueva generación se ha rediseñado por completo la arquitectura de red, eliminando toda la red de conmutación de circuitos y simplificando e integrando las funcionalidades de varios elementos. Además, se han incluido nuevas técnicas de modulación y codificación adaptativas, mediante las cuales, un usuario puede variar en función de la calidad del enlace, el número de bit que transmite por el canal. Gracias a todas estas novedades, se han conseguido reducir tanto los costes en la red, como el enlace radio.

En el presente proyecto fin de Grado de Ingeniería en Sistemas de Comunicaciones, se va a realizar un estudio de la modulación de LTE en el enlace descendente (DL), la llamada Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (Acceso por Multiplexación ortogonal por división en frecuencia) ([OFDMA](#)). Dicha modulación consiste en dividir el ancho de banda del sistema en pequeñas subportadoras separadas entre sí la inversa de la duración de un símbolo, se asigna esta separación para poder conseguir tener ortogonalidad entre las subportadoras y así poder situarlas muy cerca unas de otras. A su vez, como el ancho de banda está dividido en múltiples subportadoras, el sistema será capaz de asignar a cada usuario un número determinado de estas, consiguiendo de esta forma, dividir el flujo de datos en múltiples flujos menores para poder multiplexar cada uno de ellos en una subportadora.

Dentro del enlace descendente, el proyecto se va a focalizar en las etapas de sincronización y búsqueda de celda. Estas etapas son el primer paso que debe de llevar a cabo un terminal ([UE](#)) que desea conectarse a una red [LTE](#). Los pasos a seguir en estas etapas se detallan en la figura 1.

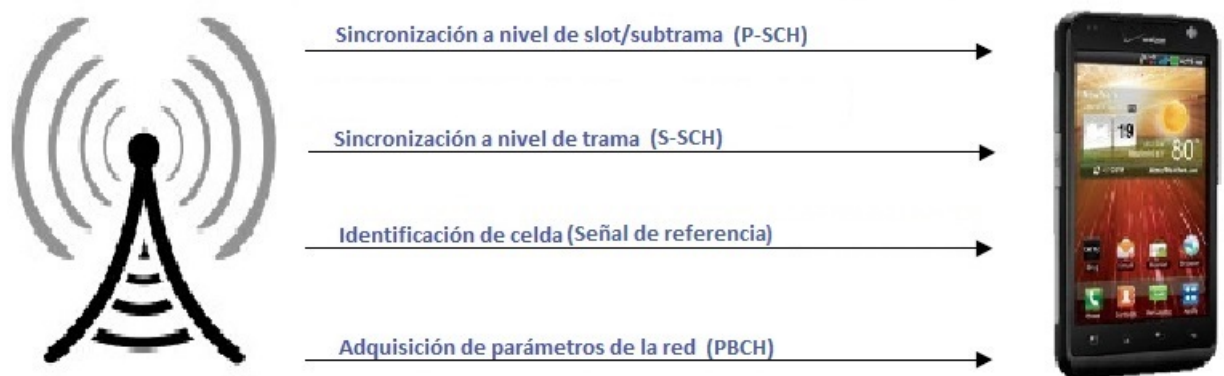


Figura 1: *Etapas de proceso de sincronización y búsqueda de celda*

En la primera parte del proyecto, se construirán las señales físicas necesarias para llevar a cabo el algoritmo de búsqueda de celda y sincronización según el estándar del 3GPP TS 36.211 v.9.1.0 [1]. Las señales implementadas son la Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**), mediante la cual se obtendrá la sincronización de slot o subtrama, la Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**), mediante la cual se conseguirá la sincronización de trama y la señal de referencia, mediante la cual se obtendrá la identificación de celda.

En la segunda parte del proyecto, se simulará el algoritmo de búsqueda de celda y sincronización que deberá de ejecutar el terminal cuando quiera conectarse a una red **LTE**. Para poder ejecutar el algoritmo propuesto, serán necesarias las señales generadas en la primera parte del proyecto. Todas estas señales y el algoritmo anteriormente mencionado, se implementarán utilizando el lenguaje de programación Matlab.

Por último, se realizarán una serie de simulaciones para obtener diferentes medidas de la señal tanto en tiempo como en frecuencia, que permitirán validar el diseño del algoritmo simulado en la segunda parte del proyecto.

PALABRAS CLAVE: **OFDMA**, **LTE**, Sincronización, Búsqueda de celda, Trama, Eficiencia Espectral, Subportadora.

Abstract

As Aristóteles said, man is a social being by nature and as such he has always felt the need to communicate with others. This, coupled with the desire to improve himself, has led him to try to always find the best way to communicate among themselves.

In recent times, one of the main ways used by humans to communicate have been the mobile communications. The mobile communications sector has become one of the most important and developed media. The current market of mobile communications is highly dynamic and requires a high adaptation and anticipation to meet the needs demanded by users at all times. It is for this reason that the big telecommunications companies spend a lot of money on developing new techniques for meeting those needs.

Currently, one of the most important issues studied by telecommunication companies is that the cost associated with the deployment and operation of mobile communication networks has some proportionality to the volume of carried traffic, with which, in order to provide an acceptable QoS it will be necessary reduce the cost per bit in the transmission, which translates in try to convey the maximum amount of data using the minimum possible band width, i.e., to have a system which possesses a high spectral efficiency.

One of the newest techniques that improves the spectral efficiency and achieves higher levels of capacity is known as OFDM. The OFDM is now used in many systems such as: TDT (Digital Terrestrial Television) or IEEE 802.11 a / g (WIFI). Also, with this technique, it has been possible to establish the bases for medium access techniques used in LTE systems, such as OFDMA in the downlink and SC-FDMA uplink.

In addition to the new medium access techniques previously mentioned, the LTE has been a radical change regarding the previous generations, because this new generation has completely redesigned the network architecture, removed all circuit switched networks and simplifying the functionalities of several elements. Also included new techniques of adaptive modulation due to this, a user may change modulation depending on the quality of the link. Thanks to all these improvements has been achieved to reduce the costs on the network.

In the present final project of Bachelor's Degree in Communications Systems Engineering we will focus on the study of the modulation of LTE downlink (DL) OFDMA. This modulation consists in split the system bandwidth into smaller subcarriers spaced each other the inverse of the duration of a symbol, with this separation is obtained orthogonally between subcarriers so you can place them very close to each other. In turn, as we have the bandwidth split into multiple subcarriers, the system will be able to assign to each user a number of these subcarriers, thus achieving dividing the flow of data into multiple lower flows to multiplex each them on a subcarrier.

In the downlink, the project will be focused on the stages of synchronization and cell search. These steps are the first step that must to perform a UE which you are connecting to an LTE network. The steps to follow in these stages are detailed in Figure 2.

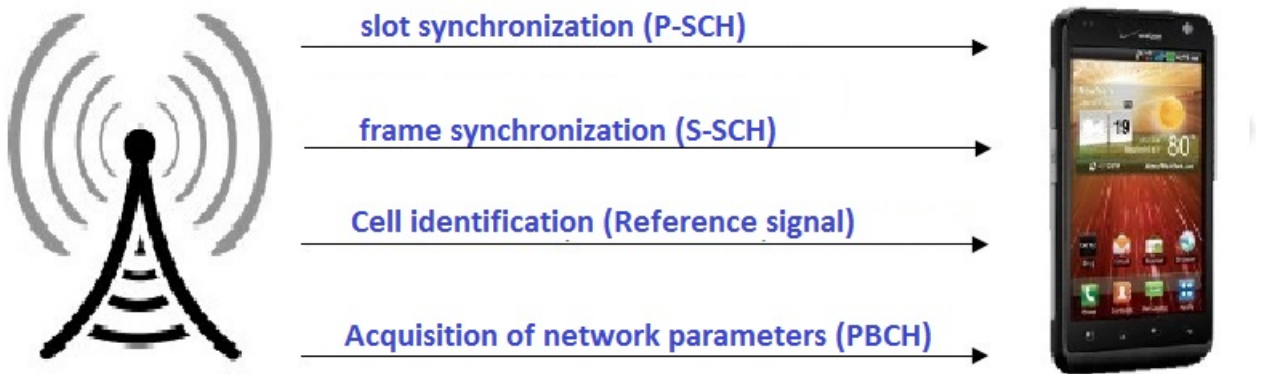


Figura 2: *Stages of synchronization and cell search algorithm*

In the first part of the project, there will be implemented the physical signs necessary to carry out the synchronization and cell search algorithm based on the 3GPP standard. The implemented signal are the P-SCH, whereby obtain the slot timing, the S-SCH, through which obtain frame synchronization and reference signals, whereby it will obtain the cell identification.

In the second part of the project, the synchronization and cell search algorithm will be simulated. To execute the proposed algorithm will be required signals generated in the first part of the project. All these signs and the previously mentioned algorithm are implemented using the Matlab programming language.

Finally, we will perform some simulations in order to obtain different measures of the signal both in time or the frequency, to validate the design of the algorithm simulated in the second part of the project.

KEYWORDS: OFDMA, LTE, Synchronization, cell search, frame, spectral efficiency, subcarrier.

Índice general

Resumen	IX
Abstract	XIII
Lista de Acrónimos	XXIV
Introducción	1
0.1. Motivación	2
0.2. Objetivos	2
0.3. Alcance	3
0.4. Contexto	3
0.5. Experiencias Previas	3
0.6. Contenido de la memoria	4
Medios Empleados	7
1. Estado del Arte	9
1.1. Un poco de Historia	10
1.1.1. Generación Cero (0G)	10
1.1.2. Primera Generación 1G	11
1.1.3. Segunda Generación 2G	12
1.1.4. Tercera Generación 3G	13
2. Cuarta Generación 4G LTE (Long Term Evolution)	15
2.1. Técnicas de acceso al medio OFDM	17

2.1.1.	OFDMA	19
2.1.1.1.	Modulación y codificación adaptativas. Procedimientos de RRM	22
2.1.2.	SC-FDMA	24
2.2.	Interfaz y arquitectura radio	26
3.	Sincronización y Búsqueda de Celda	29
3.1.	Introducción	29
3.2.	Estructura del Slot y Recursos Elementales Físicos	31
3.2.1.	Organización tiempo-frecuencia	31
3.2.1.1.	Physical Resource Block (Bloque de Recursos Físicos) (PRB) . .	33
3.2.1.2.	Virtual Resource Block (Bloque de Recursos Virtuales) (VRB) .	34
3.3.	Estructura de Trama	34
3.3.1.	Estructura de Trama Tipo 1	35
4.	Generación de Señales de Sincronismo y de Referencia	37
4.1.	Introducción	37
4.2.	Generación de Rejilla de Recursos	38
4.3.	Identidad de Celda	39
4.4.	Señales Físicas del Enlace Descendente	40
4.4.1.	Señales de Sincronización	41
4.4.1.1.	Señal de Sincronización Primaria	42
4.4.1.1.1.	Secuencia de Generación :	43
4.4.1.1.2.	Mapeo de Recursos :	43
4.4.1.2.	Señal de Sincronización Secundaria	44
4.4.1.2.1.	Secuencia de Generación :	45
4.4.1.2.2.	Mapeo de Recursos :	48
4.4.2.	Señal de Referencia	49
4.4.2.1.	Señal de Referencia Específicas de Celda (CRS)	51
4.4.2.1.1.	Secuencia de Generación :	52
4.4.2.1.2.	Mapeo de secuencia :	53

4.5. Generación de señal OFDMA	55
4.5.1. Paso de la frecuencia al tiempo	55
4.5.2. Añadir CP	55
4.6. Modulación Señal OFDMA	57
5. Algoritmos de búsqueda de celda y sincronización	59
5.1. Introducción	59
5.2. Procedimiento de búsqueda de celda	60
5.2.1. Etapa 1 (Pre-FFT)	63
5.2.1.1. Sincronización de tiempo gruesa y detección del N_{id}^2	63
5.2.1.2. Calculo del desplazamiento de frecuencia fraccional (FFO)	64
5.2.2. Etapa 2 (Post-FFT)	64
5.2.2.1. Estimación del desplazamiento de frecuencia de la parte entera Integer Frequency Offset (Desfase de Frecuencia Entero) (IFO)	64
5.2.2.2. Estimación de N_{id}^1 y Detección del tiempo de trama	65
6. Simulación en Matlab	69
6.1. Señal de Sincronismo (SCH)	70
6.1.1. Señal de Sincronización Primaria (P-SCH)	71
6.1.2. Señal de Sincronización Secundaria (S-SCH)	73
6.2. Señal OFDMA	75
6.3. Algoritmo de Búsqueda de Celda y Sincronización	80
6.3.1. Etapa 1 (Pre-FFT)	80
6.3.2. Etapa 2 (Post-FFT)	82
7. Gestión del Proyecto	85
7.1. Fases del proyecto	85
7.2. Tiempo de las Fases del proyecto	86
8. Presupuesto Del Proyecto	87
8.1. Costes de personal	87
8.2. Costes de material	88
8.3. Costes Total de Proyecto	89

9. Conclusiones	91
9.1. Conclusiones Generales	91
9.2. Dificultades	93
9.3. Líneas futuras	94
10.Opinión Personal	95
APÉNDICES	97
A. MIMO (Multiple Input- Multiple Output)	99
A.1. Tipos de Transmisión del Canal PDSCH (Modos MIMO en LTE)	100
B. Sistema de Información	103
C. Secuencias utilizadas en LTE	107
C.1. Secuencias de Zadoff-Chu	107
C.2. Secuencias de tipo GOLD	108
C.3. Secuencias de Máxima Longitud (m-sequences)	108
Bibliografía	110

Lista de Figuras

1.	<i>Etapas de proceso de sincronización y búsqueda de celda</i>	XI
2.	<i>Stages of synchronization and cell search algorithm</i>	XV
1.1.	<i>Evolución de las Comunicaciones Móviles.(Imagen de http://cnmcblog.es/)</i>	9
1.2.	<i>Motorola Handie Talkie H12-16.[15]</i>	10
1.3.	<i>Martin Cooper con el DynaTAC 8000x.[15]</i>	11
1.4.	<i>Móviles de segunda generación.[15]</i>	12
1.5.	<i>Móviles de tercera generación.[15]</i>	13
2.1.	<i>Características de los sistemas LTE[13]</i>	17
2.2.	<i>Ancho de banda de una señal OFDM</i>	18
2.3.	<i>Multiplexación de usuarios en OFDMA.[13]</i>	20
2.4.	<i>Multiplexación de usuarios en OFDMA en subportadoras no contiguas.</i>	20
2.5.	<i>Scheduling de paquetes en OFDMA [13]</i>	23
2.6.	<i>Adaptación de enlace en OFDMA [13]</i>	23
2.7.	<i>Transmisión de la señal SC-FDMA [13]</i>	25
2.8.	<i>OFDMA vs SC-FDMA.[12]</i>	25
2.9.	<i>Comparación de las arquitecturas de red LTE vs UMTS</i>	27
3.1.	<i>Rejilla de Recursos del Downlink[1].</i>	31
3.2.	<i>Concepto de PRB (Physical Resource Block)[13].</i>	33
3.3.	<i>Estructura de Trama tipo 1 con CP normal</i>	36
3.4.	<i>Estructura de Trama tipo 1 con CP extendido</i>	36

4.1.	<i>Rejilla de Recursos generada en el transmisor [12]</i>	38
4.2.	<i>Ejemplo de un patrón de Reutilización 3</i>	39
4.3.	<i>Estructura de Trama tipo 1 (modo FDD)[8]</i>	41
4.4.	<i>Tabla de mapeo entre N_{ID}^1 y los índices $m0$ y $m1$ [1]</i>	46
4.5.	<i>Ejemplo típico de señales de referencia para una subtrama con 12 subportadoras [13]</i>	49
4.6.	<i>RE's utilizados para la transmisión de la señal de referencia específica de usuario</i>	54
4.7.	<i>Inserción del prefijo cíclico</i>	56
5.1.	<i>Diagrama de bloques del algoritmo para la búsqueda de celda y sincronización[6]</i>	62
6.1.	<i>Autocorrelación de las señales P-SCH</i>	71
6.2.	<i>Valor del PAPR en la P-SCH</i>	72
6.3.	<i>Señal P-SCH generada por el transmisor</i>	72
6.4.	<i>Autocorrelación de las señales S-SCH</i>	73
6.5.	<i>Valor del PAPR en la S-SCH</i>	74
6.6.	<i>Señal P-SCH generada por el transmisor</i>	74
6.7.	<i>Trama Radio OFDMA en el dominio del tiempo</i>	76
6.8.	<i>Espectro de la trama OFDMA</i>	77
6.9.	<i>Slot de una Señal OFDMA en el dominio del tiempo</i>	78
6.10.	<i>Valor del PAPR para cada símbolo OFDMA de una trama radio</i>	79
6.11.	<i>Detección del valor de N_{id}^2</i>	80
6.12.	<i>Sincronización temporal gruesa</i>	81
6.13.	<i>Detección del valor de N_{id}^1</i>	82
7.1.	<i>Diagrama de Gannt</i>	86
B.1.	<i>Mapeo entre SIBs y SI[13]</i>	105
C.1.	<i>Generador de secuencia de máxima longitud [13]</i>	108

Lista de Tablas

3.1. Tabla de parámetros según ancho de banda	32
4.1. Tabla del parámetro u en función de N_{id}^2	43
7.1. Fases del Proyecto	85
8.1. Costes de Personal	87
8.2. Costes de Material Hardware	88
8.3. Costes de Material Software	88
8.4. Costes de Materiales variados no atribuibles	88
8.5. Costes Total de Proyecto	89

Lista de Acrónimos

AMPS	Advanced Mobile Phone System (Sistema de Telefonía Móvil Avanzado)
CDMA	Acceso múltiple por división de código
Cell-ID	Identidad de Celda
CP	Prefijo Cíclico (Cyclic Prefix)
CRS	Cell-specific Reference Signal (Señal de referencia específica de celda)
DFT	Discrete Fourier Transform (Transformada Discreta de Fourier)
eNB	Evolved Node B (Nodo B evolucionado)
EPC	Evolved Packet Core (Red de paquetes evolucionada)
EPS	Evolved Packet System (Sistema de paquetes evolucionado)
ETWS	Earthquake and Tsunami Warning System ⁵⁰ (Sistema de aviso de terremotos y Tsunami)
EUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (Red de Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionada)
FDD	Frequency-Division Duplexing (Multiplexación por división en frecuencia)
FFO	Fractional Frequency Offset (Desfase de Frecuencia Fraccional)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada de Fourier Rápida)
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPRS	General Packet Radio Service (servicio general de paquetes vía radio)
GSM	Global System for Mobile (Sistema Global para Móvil)
HSPA	High Speed Packet Access (Acceso de paquetes a alta velocidad)
IDE	entorno de desarrollo integrado
IFO	Integer Frequency Offset (Desfase de Frecuencia Entero)

IP	Internet Protocol (Protocolo internet)
ISI	Interferencia Intersimbólica
LTE	Long Term Evolution (Evolución a Largo Plazo)
Matlab	MATrix LABoratory (Laboratorio de matrices)
MBSFN	Multicast-Broadcast over Single-Frequency Network (Red Multicast-Broadcast sobre frecuencia unica)
MIB	Master Information Block (Bloque Master de Información)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Múltiples entradas Múltiples salidas)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexación ortogonal por división en frecuencia)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (Acceso por Multiplexación ortogonal por división en frecuencia)
PAPR	Peak to Average Power Ratio (Relación de pico a potencia media)
PBCH	Physical Broadcast Channel (Canal Físico de Broadcast)
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel (Canal compartido del Enlace físico descendente)
PHICH	Physical HARQ Indicator Channel (Canal Indicador HARQ físico)
PMCH	Physical Multicast Channel (Canal Multicast físico)
PRB	Physical Resource Block (Bloque de Recursos Físicos)
P-SCH	Señal de Sincronización Primaria
QoS	Quality of Service (Calidad de Servicio)
RB	Resource Block (Bloque de Recursos)
RE	Resource Element (Elemento de Recursos)
RNC	Radio Network Controller (Controlador de Sistema Radio)

RPS	señal de referencia primaria
RRM	Radio Resource Management (gestión de recursos radio)
RSS	señal de referencia secundaria
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiplexing Access (Acceso por Multiplexación por división en frecuencia única)
SCH	Canal de Sincronización
SFN	System Frame Number (Numero de trama del sistema)
SI	Información del Sistema (Information System)
SIB1	System Information Blocks I(Bloque de Información de Sistema I)
SIB10	System Information Blocks X(Bloque de Información de Sistema X)
SIB11	System Information Blocks XI(Bloque de Información de Sistema XI)
SIB2	System Information Blocks II(Bloque de Información de Sistema II)
SIB3	System Information Blocks III(Bloque de Información de Sistema III)
SIB4	System Information Blocks IV(Bloque de Información de Sistema IV)
SIB5	System Information Blocks V(Bloque de Información de Sistema V)
SIB6	System Information Blocks VI(Bloque de Información de Sistema VI)
SIB7	System Information Blocks VII(Bloque de Información de Sistema VII)
SIB8	System Information Blocks VIII(Bloque de Información de Sistema VIII)
SIB9	System Information Blocks IX(Bloque de Información de Sistema IX)
SIBs	System Information Blocks (Bloque de Información de Sistema)
SMS	mensajes de texto
S-SCH	Señal de Sincronización Secundaria

TACS	Total Access Communications System (Sistema de Comunicación de acceso total)
TDD	Time-Division Duplexing (Multiplexación por división en tiempo)
TDMA	Acceso múltiple por división de tiempo
UE	User Equipment (Equipo de Usuario)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles)
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network (Red Universal de Acceso Radio Terrestre)
VHDL	VHSIC Hardware Description Language (Lenguaje de Descripción Hardware VHSIC)
VoIP	Voice over IP (Voz sobre Protocolo de Internet)
VRB	Virtual Resource Block (Bloque de Recursos Virtuales)
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access (Acceso múltiple por división de código de banda ancha)

Introducción

Desde hace un par de décadas la telefonía móvil se ha convertido en uno de los medios más importantes y más utilizados por las personas a la hora de comunicarse. Por este motivo, el mundo de las comunicaciones móviles está en continuo crecimiento y no paran de surgir nuevas tecnologías y mejoras para poder ofrecer a los usuarios una mejor calidad de servicio.

Después de haber pasado por 1G([GSM](#)), 2G([GPRS](#)), 3G([UMTS](#)) y la última 3.5G([HSPA](#)), actualmente se está consolidando la última generación, la llamada 4G. Esta generación se la conoce con el nombre de Long Term Evolution (Evolución a Largo Plazo) ([LTE](#)), y surge por la necesidad de encontrar un nuevo sistema all-IP, es decir, un sistema en el que todos los servicios, incluida la voz, sean tratados como paquetes de datos, gracias a esto, se podrá conjugar una capacidad multimedia con una movilidad plena.

En este proyecto se va a estudiar la nueva técnica de acceso [OFDMA](#) utilizada por [LTE](#) para el enlace descendente, además, se implementará el algoritmo de búsqueda de celda y sincronización que lleva a cabo un terminal que quiera conectarse a la nueva red.

0.1. Motivación

La motivación del presente proyecto fin de grado es llevar a cabo una implementación software de las etapas de búsqueda de celda y sincronización de un sistema de comunicaciones móviles de cuarta generación [LTE](#) utilizando el lenguaje de programación [Matlab](#) y tomando como referencia el estándar del 3GPP TS 36.211 V12[1]. Se ha decidido estudiar la nueva generación [LTE](#), ya que actualmente es la tecnología que se está implantando en España, y de esta forma, el alumno podrá conocer y estudiar con detalle el funcionamiento de las diferentes etapas que la componen.

0.2. Objetivos

Este proyecto fin de grado nace de la necesidad de implementar un sistema de comunicaciones móviles de cuarta generación basado en tecnología [OFDMA](#), para así conseguir tener una plataforma en la que poder comprobar el funcionamiento y rendimiento de todos los estudios y mejoras que se llevan a cabo en el departamento de Teoría de la Señal de la Universidad Carlos III de Madrid.

Por tanto, el objetivo de este proyecto es crear el primer bloque que simule el proceso de búsqueda de celda y sincronización de un sistema de comunicaciones [LTE](#). Se va a diseñar este bloque en primer lugar, ya que, este proceso es el primer proceso que debe de llevar a cabo un terminal que quiera conectarse a la red.

Para diseñarlo se utilizará un simulador como MATrix LABoratory (Laboratorio de matrices) ([Matlab](#)) para poder obtener de una forma clara y precisa unas estimaciones del funcionamiento de dicho bloque de sincronismo.

A continuación se van a enumerar de forma más detallada los principales objetivos del proyecto:

- Diseñar un transmisor que sea capaz de generar las señales de referencia y sincronismo de un sistema de cuarta generación.
- Diseñar el bloque de sincronismo del receptor para que este sea capaz de: analizar las señales recibidas, corregir los desfases producidos por el canal, conocer la longitud del prefijo cíclico, llevar a cabo la sincronización de trama y subtrama y obtener la identificación de celda utilizada por el transmisor.

0.3. Alcance

Con este proyecto fin de grado se dejarán creadas las señales de referencia y sincronismo generadas por el transmisor y el módulo de sincronismo del receptor [OFDM](#) para que de esta forma, en el futuro, algunos proyectos puedan ser capaces de diseñar el resto de bloques del sistema de comunicaciones móviles de cuarta generación y así el sistema pueda quedar completo.

0.4. Contexto

Este proyecto fin de grado se ha llevado a cabo en el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Carlos III de Madrid en el año 2013 y se encuentra enmarcado dentro de una línea de trabajo que busca generar un sistema de comunicaciones móviles de cuarta generación basado en tecnología OFDMA, para así poder poner en práctica algunas de las investigaciones realizadas por profesores del departamento.

En particular este proyecto se ha llevado a cabo, ya que en la actualidad, los sistemas móviles de cuarta generación están a la orden del día por su actual llegada al mercado de las telecomunicaciones.

0.5. Experiencias Previas

Este proyecto fin de grado se basa en los nuevos sistemas de cuarta generación [LTE](#), al ser estos tan recientes, no se tiene constancia de experiencias previas acerca de los mismos. Es por ese motivo por el cual, el presente proyecto fin de grado quiere lograr comenzar una serie de proyectos que den lugar al estudio y conocimiento de estos nuevos sistemas para de esta forma poner llevar a cabo futuras mejoras y ampliaciones de los mismos. Además del presente proyecto fin de grado, dentro del departamento de Teoría de la Señal de la Universidad Carlos III de Madrid se están llevando a cabo otra serie de proyectos en paralelo que también tienen como objetivo el estudio y conocimiento de los nuevos sistemas de cuarta generación.

0.6. Contenido de la memoria

A continuación se describe de forma resumida cada uno de los capítulos que forman parte de la memoria:

Capítulo 0: Se realizará una descripción del entorno de trabajo utilizado para realizar el presente proyecto a nivel de software. Se examinará la herramienta de programación utilizada para simular el algoritmo, así como el editor de textos seleccionado para la creación de la presente memoria.

Capítulo 1: Se realizará un breve resumen de los sistemas de comunicaciones anteriores al actual, explicando de forma resumida las principales características de cada uno de ellos.

Capítulo 2: Se realizará una breve introducción al nuevo sistema de comunicaciones de cuarta generación [LTE](#), describiendo de forma detallada sus principales novedades, para poder comprender de forma más clara el funcionamiento de los diferentes algoritmos y características explicados en los sucesivos capítulos.

Capítulo 3: Se explicarán de forma detallada las principales características de la trama radio del nuevo sistema de comunicaciones LTE implementado en el presente proyecto.

Capítulo 4: Se analizará el estándar de [LTE 3GPP TS 36.211 \[1\]](#), explicando detalladamente cuáles son los pasos a seguir para implementar en un transmisor ([eNB](#)) las señales de sincronización (SCH) y las señales de referencia de celda. Estas señales serán utilizadas en el capítulo [5](#) para poder llevar a cabo la simulación del algoritmo de búsqueda de celda y sincronización.

Capítulo 5: Se detallarán las características del algoritmo elegido para poder implementar en un terminal ([UE](#)) la etapa de sincronización y búsqueda de la celda.

Capítulo 6: En este capítulo se exponen los resultados obtenidos sobre el algoritmo descrito en el capítulo 5. Además se detallarán las diferentes mediciones realizadas sobre el sistema así como una comparación entre los resultados ideales y los resultados obtenidos.

Capítulo 7: En este capítulo se describen las diferentes etapas en las que se ha dividido el proyecto, así como el tiempo empleado en el desarrollo de cada una de ellas.

Capítulo 8: En este capítulo se especificará el presupuesto asociado a la realización del presente proyecto fin de grado, se han tenido en cuenta tanto los costes de personal, los de material, como los indirectos.

Capítulo 9 Se establecerán las conclusiones sobre el sistema desarrollado en el presente proyecto. Se describirán las principales dificultades surgidas durante el desarrollo del mismo. Y por último se intentará establecer posibles mejoras que se puedan aplicar al sistema desarrollado.

Apéndice A: Se hará una breve descripción acerca del funcionamiento de la técnica MIMO y se explicarán de forma más detallada los diferentes tipos de modos de MIMO utilizados para la transmisión por el canal PDSCH en LTE.

Apéndice B: Se detallarán los diferentes tipos de SIBs que son transmitidos por los diferentes canales Físicos, así como la información que transportan cada uno de ellos.

Apéndice C: Se explicarán de forma más concreta los diferentes tipos de secuencias utilizadas por el estándar LTE. Estas secuencias son: las secuencias de Zadoff-Chu, las secuencias tipo GOLD y las m-secuencias.

Medios Empleados

Software

Matlab

[Matlab](#)^[16] es una herramienta matemática que ofrece al usuario un entorno de desarrollo integrado ([IDE](#)) mediante la utilización de un lenguaje de programación propio. Entre las características básicas de este programa se encuentran la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, y su herramienta más potente, la manipulación de matrices.

Se ha optado por utilizar este programa por su gran capacidad para la simulación y generación de las diferentes señales, así como por el amplio conocimiento que tiene el alumno acerca de él.

Otra característica destacable del programa es la posibilidad de crear código [VHDL](#), algo muy favorable para futuras mejoras del proyecto, ya que este tipo de lenguaje lo utiliza la gran mayoría de placas [FPGA](#), y por lo tanto sería muy sencillo adaptarlo a ellas.

L^AT_EX

L^AT_EX[17] es una herramienta utilizada para la generación de textos, esta herramienta está orientada especialmente a la creación de documentos científicos y técnicos por su gran facilidad a la hora de introducir de fórmulas matemáticas. Otra de las grandes características con las que cuenta L^AT_EX es la excelente calidad de imprenta que ofrece.

Además gracias a la utilización de este software el alumno ha conseguido familiarizarse con este lenguaje y poder adquirir conocimientos acerca de la generación de documentos técnicos, algo que puede resultar muy útil en el futuro.

Para generar los documentos en L^AT_EX se ha optado por utilizar:

- El compilador MiKTeX. <http://miktex.org/>
- El editor de texto TeXnicCenter. <http://www.texniccenter.org/>
- Un visor de documentos como Adobe Reader. <http://www.adobe.com/es/>

Hardware

Como herramientas hardware se ha utilizado:

- Ordenador portátil LG, modelo S510 <http://www.lg.com/es/tablets/lg-S510>

Capítulo 1

Estado del Arte

Para situar al lector dentro del contexto del presente trabajo fin de grado, conviene alejar el foco del tema principal. A continuación se va a realizar una breve descripción de las principales características y de como han ido evolucionando las comunicaciones móviles desde la primera generación conocida o 0G, hasta el actual y más moderno 4G.

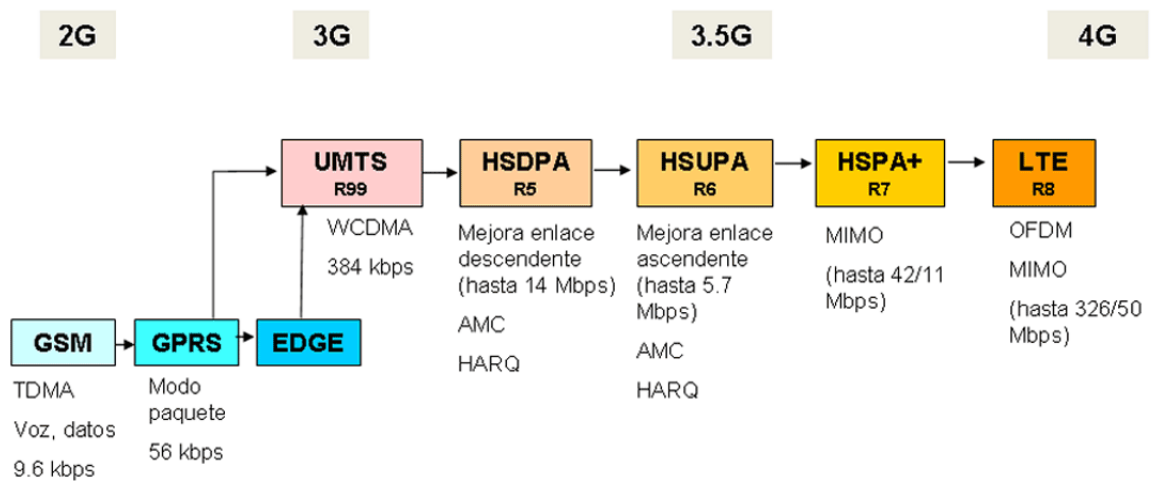


Figura 1.1: *Evolución de las Comunicaciones Móviles.*(Imagen de <http://cnmcblog.es/>)

1.1. Un poco de Historia

1.1.1. Generación Cero (0G)

Todo lo que se conoce hoy día por comunicaciones móviles tuvo su inicio durante la segunda guerra mundial allá por el año 1940, comenzó por la estricta necesidad que tenían las tropas para comunicarse entre sí en cualquier momento y desde cualquier lugar. La empresa Motorola creó el llamado Handie Talkie H12-16.



Figura 1.2: *Motorola Handie Talkie H12-16.*[\[15\]](#)

El Handie Talkie H12-16 es un dispositivo basado en la transmisión de ondas radio, esta tecnología supuso una revolución de enormes proporciones, ya que, en los años 50 y 60, comenzaron a desarrollarse multitud de nuevos aparatos basados en esta tecnología, los llamados Walkie-Talkie. Aunque estos aparatos no pueden considerarse como teléfonos móviles, a partir de este momento se comenzó a perfeccionar las características de este nuevo sistema hasta llegar a lo que hoy en día conocemos como teléfonos móviles.

Los estándares en los que se basó la generación cero fueron:

- PTT (Pulse To Talk): Pulsa para hablar.
- IMTS (Improved Mobile Telephone System): Sistema de Telefonía móvil mejorado.

1.1.2. Primera Generación 1G

Durante la primera generación 1G, los teléfonos móviles estaban concebidos únicamente para dar servicios de voz de manera analógica, utilizando primeramente la modulación AM (modulación en amplitud) y finalmente la modulación FM (modulación en frecuencia), en ese momento la calidad y la velocidad de los enlaces eran muy bajas. Se adaptó el sistema [AMPS](#) a los requisitos europeos, y se llamó Total Access Communications System (Sistema de Comunicación de acceso total) ([TACS](#)). [TACS](#) englobaba a todas las tecnologías de comunicaciones móviles analógicas existentes en ese momento. El hecho de que las tecnologías fueran analógicas traía una serie de inconvenientes como que solo se podía transmitir voz o su baja seguridad, ya que permitía escuchar llamadas ajenas con un sintonizador de radio.

El que se puede considerar como primer teléfono móvil corrió a cargo de Motorola en 1973 y fue el llamado DynaTAC 8000X, este teléfono tiene la anécdota de que fue utilizado por Martin Cooper, presidente de Motorola en ese momento, para llamar a su máximo rival en aquel momento, Joel Engel presidente de ATT.

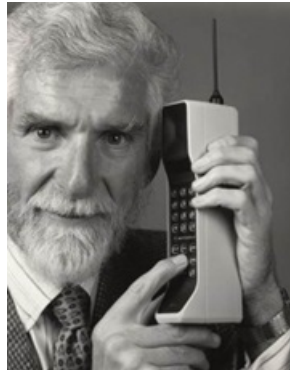


Figura 1.3: *Martin Cooper con el DynaTAC 8000x.*[\[15\]](#)

1.1.3. Segunda Generación 2G

No fue hasta los inicios de la década de los 90 cuando se pudo considerar que surgió el llamado “*Sector de las Comunicaciones Móviles*“, este sector nació a causa del exponencial crecimiento que estaban sufriendo los usuarios de voz, junto con el entorno cada vez más competitivo que había a nivel mundial, gracias a esto se creó que lo que se conoce como Segunda Generación (2G).

La principal diferencia de esta Segunda Generación con respecto a la anterior fue la utilización de sistemas digitales, de entre los diferentes sistemas digitales que coexistían por aquel entonces, el más importante era el llamado **GSM**, el cual, a la postre, sería el que finalmente se utilizara para esta segunda generación.

En Europa, el estándar **GSM** utilizaba las bandas de frecuencia de 900MHz y 1800 MHz. Además implementaba tanto técnicas **TDMA**, como técnicas **CDMA**, lo cual permitía un rendimiento máximo de 9,6 kbps, lo que equivalía a velocidades de información altas para la voz, pero limitadas en comunicación de datos. Gracias a la digitalización del sistema, se pudieron introducir una serie de servicios adicionales entre los que destaca los famosos mensajes cortos de texto o **SMS**.

En el año 2001 surgió la denominada 2.5G como paso previo antes de la tercera generación. La tecnología más importante de esta generación fue el **GPRS**. Esta era una tecnología de conmutación de paquetes que se podía integrar de forma sencilla en la estructura de la red **GSM**. Esta nueva tecnología permitió unas velocidades de datos de 115 kbps.



Figura 1.4: Móviles de segunda generación.[15]

1.1.4. Tercera Generación 3G

En el año 2008, surge la generación conocida como 3G. Esta nace de la necesidad de mejorar y aumentar la velocidad de la transmisión de datos de la generación anterior.

La principal característica de este sistema es el uso simultáneo de voz y datos a alta velocidad (hasta 14.4 Mbit/s en descarga y hasta 5.8 Mbit/s en carga), gracias a esto, se hace posible el uso de diferentes servicios como aplicaciones multimedia, video-llamadas, descarga de programas, intercambio de correos electrónicos o mensajería instantánea.

Durante el desarrollo tecnológico de esta generación se crearon unos sistemas totalmente nuevos:

- Universal Mobile Telecommunications System (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles) ([UMTS](#)) para Europa y Japón.
- Acceso múltiple por división de código ([CDMA](#))2000 para Estados Unidos.

Ambos sistemas utilizaban la tecnología [W-CDMA](#) como interfaz radio, ya que así obtenían una gran eficiencia espectral. Cabe destacar que la 3G también incrementó el grado de seguridad al conseguir autenticar la red a la que se está conectando.



Figura 1.5: *Móviles de tercera generación.*^[15]

Debido a la clara necesidad de obtener mayores velocidades de transmisión de datos para poder seguir incluyendo nuevos y mejores servicios, surgió la llamada 3.5G o High Speed Packet Access (Acceso de paquetes a alta velocidad) ([HSPA](#)).

El [HSPA](#) se dividió en 3 etapas, en la primera, se incrementó la velocidad del enlace de bajada hasta los 10.7 Mbps incluyendo modulación y codificación adaptativas. En la segunda etapa, se incrementó la velocidad del enlace de subida hasta los 5.8Mbps realizando mecanismos HARQ (Hybrid automatic repeat request) y por último en la tercera etapa, se subieron tanto la velocidad del enlace de bajada como de subida y se incluyeron antenas con técnicas MIMO (véase Apéndice [A](#)).

La creación de la 3G junto con la generalización de las tarifas planas para el acceso a Internet móvil facilitó el gran crecimiento exponencial que tuvo el tráfico de datos en aquel momento. Asimismo, el desarrollo tecnológico alcanzado hasta ese momento permitió la compatibilidad mundial y la coexistencia con los servicios móviles de la anterior generación (2G).

Cuarta Generación 4G LTE (Long Term Evolution)

La cuarta generación, o 4G, supone un cambio radical respecto a la anterior, esta se creó con la motivación de evolucionar hacia una completamente digital, donde por primera vez, todos los servicios, incluida la voz, se soportaran usando el protocolo [IP](#).

En particular, algunos de los objetivos de esta 4G son:

- Velocidades de transmisión de 100 Mbps en el enlace descendente y de 50 Mbps en el enlace ascendente, mejorando ostensiblemente la velocidad de transmisión en el extremo de la celda.
- Mejorar la eficiencia espectral en un factor 2 o 4 con respecto a la anterior generación.
- Latencia del plano de usuario en la red de acceso radio inferior a 10 ms.
- Flexibilidad del espectro y ancho de banda escalable (de 1.4 a 20 MHz).
- Mantener la interoperabilidad con los sistemas de la anterior generación (3G) y ser compatible con sistemas que no pertenezcan al 3GPP.
- Tener hasta 200 usuarios activos en 5MHz.
- Buena movilidad
 - Optimizado para 0-15 Km/h

- Buenas prestaciones de 15-120 Km/h
- Posible hasta 350 Km/h
- Reducción de costes, tanto de capital (CAPEX) como de operación (OPEX).

Gracias a estos objetivos, los sistemas de 4G quieren ofrecer al usuario móvil una serie de nuevos servicios como son: el acceso continuado a la información en tiempo real, poder disfrutar de los nuevos servicios multimedia como los juegos en red o la posibilidad de realizar llamadas mediante [VoIP](#).

Algunas de las principales características de los sistemas de esta nueva generación son:

- *Técnicas de acceso al medio [OFDM](#):*
 - **Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access ([OFDMA](#))** si estamos en el enlace descendente (DL)
 - **Single Carrier Frequency Division Multiplexing Access ([SC-FDMA](#))** si estamos en el enlace ascendente (UL)
- Técnicas Multiple Input Multiple Output (Múltiples entradas Múltiples salidas) ([MIMO](#)) (véase Apéndice [A](#))
- Simplificación de la arquitectura (véase Capítulo [2.9](#))
- Ancho de banda flexible y variable
- Modulación y codificación adaptativas

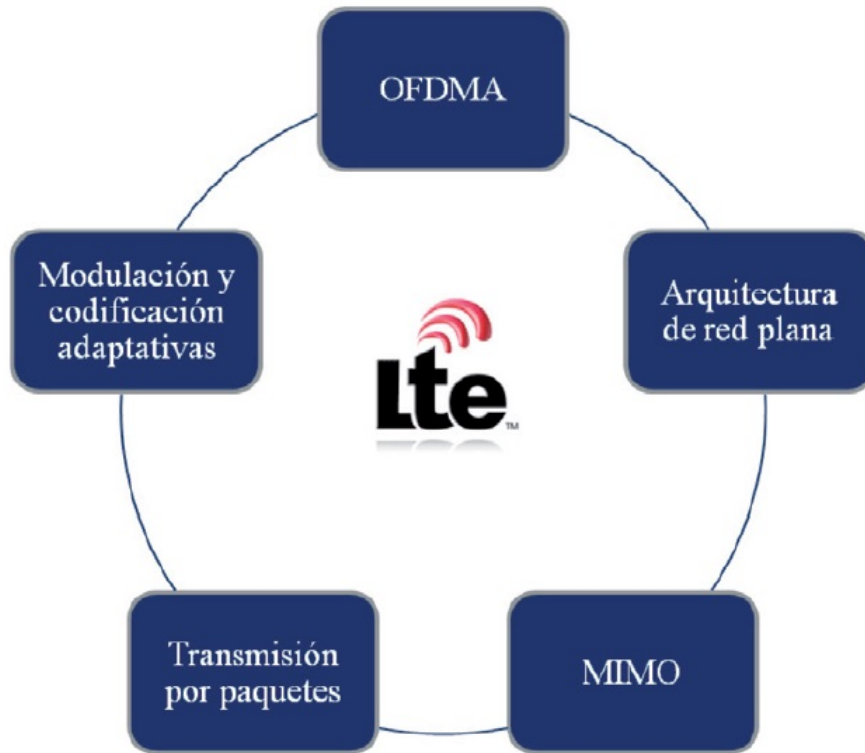


Figura 2.1: Características de los sistemas LTE[13]

2.1. Técnicas de acceso al medio OFDM

Las técnicas Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexación ortogonal por división en frecuencia) (OFDM) consisten en dividir el ancho de banda total en múltiples subportadoras espaciadas entre sí la inversa de la duración de un símbolo ($\Delta f = 1/T_s$), para así poder establecer ortogonalidad entre ellas, y de esta forma poder situar las subportadoras muy próximas unas de otras, consiguiendo así mejorar de manera ostensible la eficiencia espectral del sistema. Una vez que se tiene el ancho de banda total dividido en múltiples subportadoras, se procede a dividir el flujo de datos a enviar en múltiples flujos de ancho de banda menor, para de esta forma poder multiplexar cada uno de ellos en una subportadora diferente. Gracias a la ortogonalidad entre subportadoras, es posible efectuar de forma simultánea la transmisión de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción.

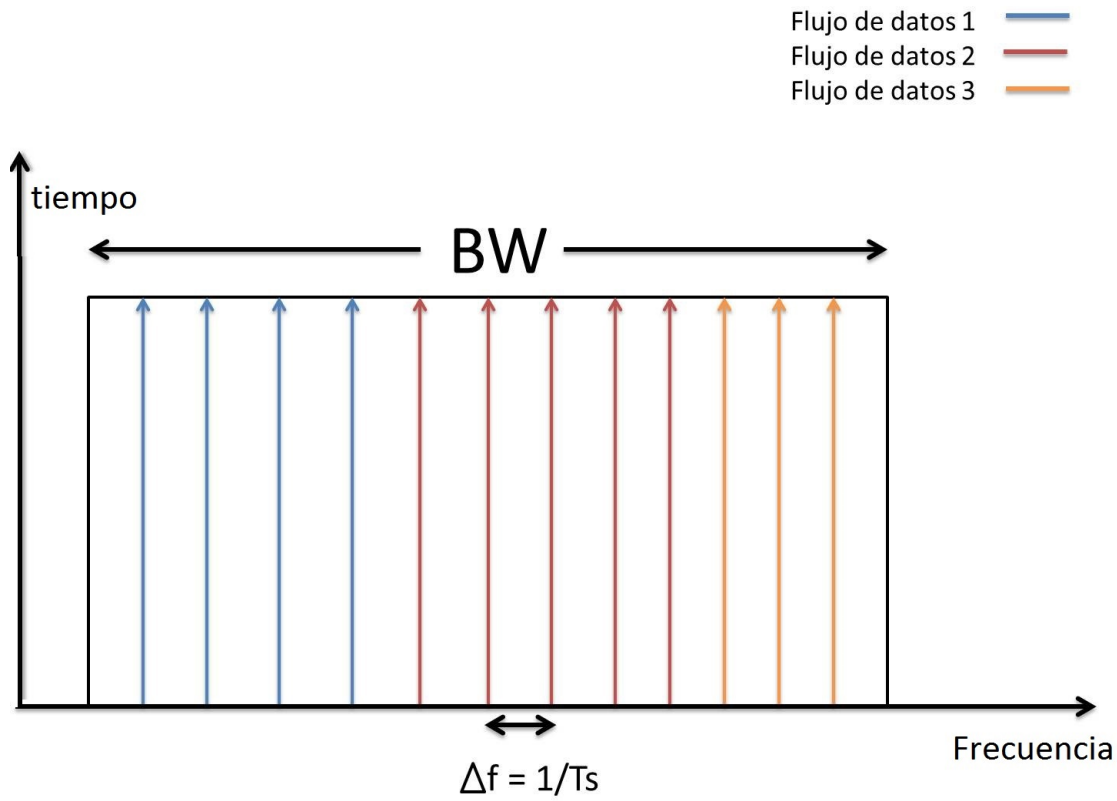


Figura 2.2: Ancho de banda de una señal OFDM

Las técnicas **OFDM** resultan un método excelente para la comunicación de datos a alta velocidad gracias a su gran robustez frente a las pérdidas por multitrayecto (multi-path), ya que, en sistemas de una única portadora, la duración de símbolo es muy pequeña y el efecto del multitrayecto recae sobre múltiples símbolos, produciendo la **ISI**. En **OFDM**, sin embargo, al ser multiportadora es factible mitigar estos efectos y satisfacer los requerimientos de velocidad y eficiencia espectral.

Las principales ventajas de los sistemas **OFDM** son:

- Aumento de la eficiencia espectral debido a la superposición de portadoras ortogonales.
- Buen comportamiento frente a los desvanecimientos (*fading*) por utilización de prefijos cíclicos **CP**.
- Ancho de banda flexible.
- Implementación fácil a través del uso de FFT e IFFT.

Entre las desventajas se encuentran:

- Una Peak to Average Power Ratio (Relación de pico a potencia media) ([PAPR](#)) muy alta, esto conlleva una baja eficiencia de los amplificadores de potencia, algo que resulta crítico en el enlace de subida (UL). Este [PAPR](#) se produce debido a que para algunas secuencias, muchas subportadoras están en fase y al sumarse se producen picos muy grandes de potencia.
- Debe de existir sincronización entre el transmisor y el receptor.
- Se requiere la utilización de bandas de guarda por la utilización de pulsos rectangulares.

La técnica [OFDM](#) ha servido como base para las técnicas de acceso al medio usadas en los sistemas de cuarta generación [LTE](#). En estos nuevos sistemas se establecen dos tipos de técnicas de acceso al medio, si nos encontramos en el enlace descendente (DL), se utilizará la técnica Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (Acceso por Multiplexación ortogonal por división en frecuencia) ([OFDMA](#)), mientras que si nos encontramos en el enlace ascendente (UL), se utilizará la técnica Single Carrier Frequency Division Multiplexing Access (Acceso por Multiplexación por división en frecuencia única ([SC-FDMA](#))).

2.1.1. OFDMA

La técnica de acceso múltiple Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (Acceso por Multiplexación ortogonal por división en frecuencia) ([OFDMA](#)), se puede considerar como una evolución de la técnica [OFDM](#) anteriormente descrita, ya que surge al considerar la posibilidad de asignar un grupo de subportadoras para cada usuario, de esta forma, es posible acomodar varias transmisiones de forma simultánea, debido a que cada una de estas transmisiones va multiplexada en una subportadora diferente.

Una vez que la señal llega al receptor, este se encarga de separar la información destinada para él de la del resto. Para poder llevar a cabo esta acción, será necesario disponer de mecanismos de señalización que identifiquen las portadoras utilizadas por cada usuario, tal y como se ilustra en la figura [2.3](#).

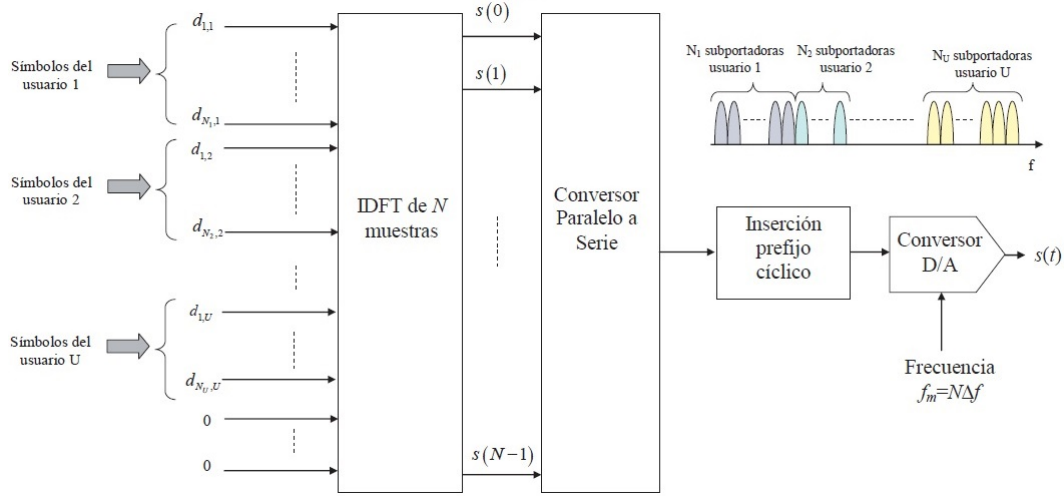


Figura 2.3: *Multiplexación de usuarios en OFDMA.*[13]

Es importante destacar que no es necesario que cada usuario utilice un conjunto de subportadoras contiguas como ilustra la figura 2.3, sino que también se podrían asignar los símbolos sobre subportadoras no contiguas tal y como ilustra la figura 2.4

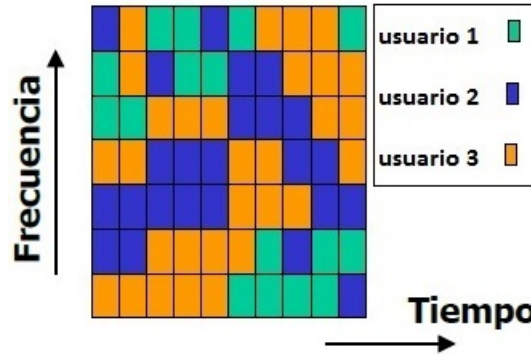


Figura 2.4: *Multiplexación de usuarios en OFDMA en subportadoras no contiguas.*

Gracias al uso de la técnica de acceso múltiple OFDMA los sistemas LTE obtienen las siguientes ventajas:

- **Robustez frente a la propagación multicamino:** Gracias a la utilización de un CP, las técnicas OFDMA son muy robusta frente a la propagación multicamino y por tanto, a la ISI resultante. Esto es particularmente relevante cuando se pretenden emplear bandas de transmisión superiores a 5 MHz como ocurre con LTE, donde estas bandas pueden llegar hasta los 20 MHz.

- **Diversidad frecuencial:** Es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas como se ilustra a figura 2.4, esto provee de diversidad frecuencial a la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia.
- **Flexibilidad en la banda asignada:** La técnica OFDMA presenta una gran ventaja a la hora de disponer de diferentes velocidades de transmisión para cada usuario, ya que basta con asignar más o menos subportadoras a cada usuario en función del ancho de banda requerido para los diferentes servicios de cada uno.
- **Diversidad multiusuario:** La asignación de subportadoras a usuarios se realiza de forma dinámica, teniendo la posibilidad de cambiar dicha asignación en períodos cortos de tiempo. De esta forma, se puede asignar a cada subportadora aquél usuario que presente un mejor estado del canal (mejor relación señal a ruido), lo que se traducirá en una mayor eficiencia espectral.
- **Elevada granularidad en los recursos asignables:** Al tener la posibilidad de dividir el ancho de banda total en pequeñas subportadoras, el sistema es capaz de asignar recursos (subportadoras) dinámicamente a cada usuario dependiendo de las necesidades del mismo. Esto tiene una gran utilidad a la hora de acomodar servicios con diferentes requerimientos de calidad.
- **Elevado grado de utilización de la banda asignada:** Gracias al uso de la transmisión OFDM, se consigue colocar las subportadoras con un espaciado mínimo (el inverso de un tiempo de símbolo), existiendo incluso una cierta superposición entre ellas, hecho que no afecta al recuperar la señal, ya que como se comentó anteriormente, las subportadoras son ortogonales entre sí.
- **Sencillez de implementación en el dominio digital:** Gracias a la posibilidad de poder utilizar procesos de FFT/IFFT, se consigue realizar una implementación de forma rápida en el dominio digital.

A continuación se van a nombrar algunas de las desventajas que presenta esta tecnología:

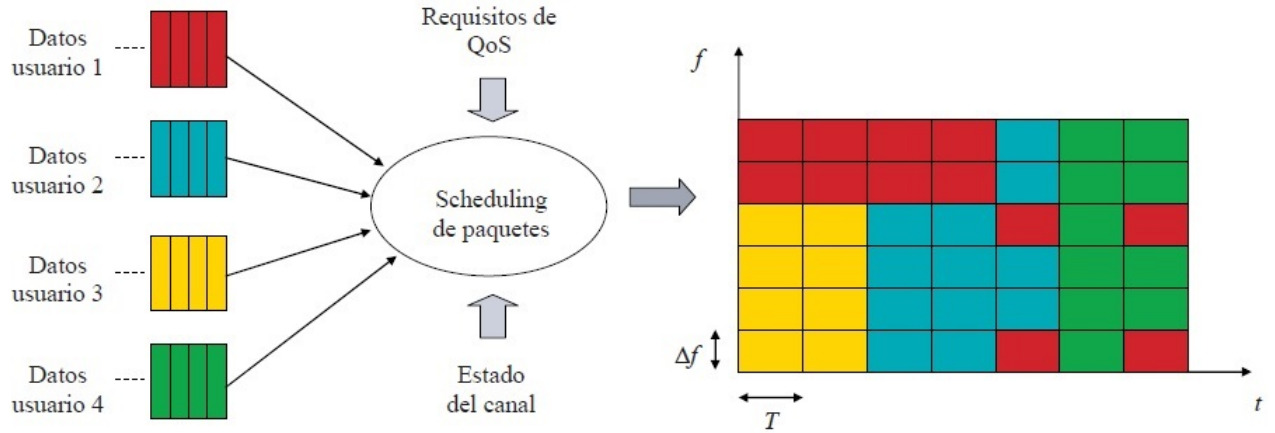
- **Susceptibilidad frente a desplazamientos de frecuencia:** Si se producen desplazamientos en la frecuencia de las subportadoras con respecto a la frecuencia de referencia, se generará una cierta pérdida de ortogonalidad, lo que se traducirá en una interferencia entre subportadoras. Para corregir estos desplazamientos, se dispone de ciertos mecanismos que se realizan durante la etapa de sincronismo, estos mecanismos serán explicados en profundidad en el Capítulo 5 apartados 5.2.2.1 y 5.2.1.2.

- **Valor alto de la Peak to Average Power Ratio (Relación de pico a potencia media) (PAPR):** Tener un valor alto de PAPR consiste en que la potencia instantánea transmitida es en algunos casos significativamente superior a la potencia media, esto genera problemas de linealidad para los amplificadores de potencia, ya que limita su eficiencia e incrementa su coste.

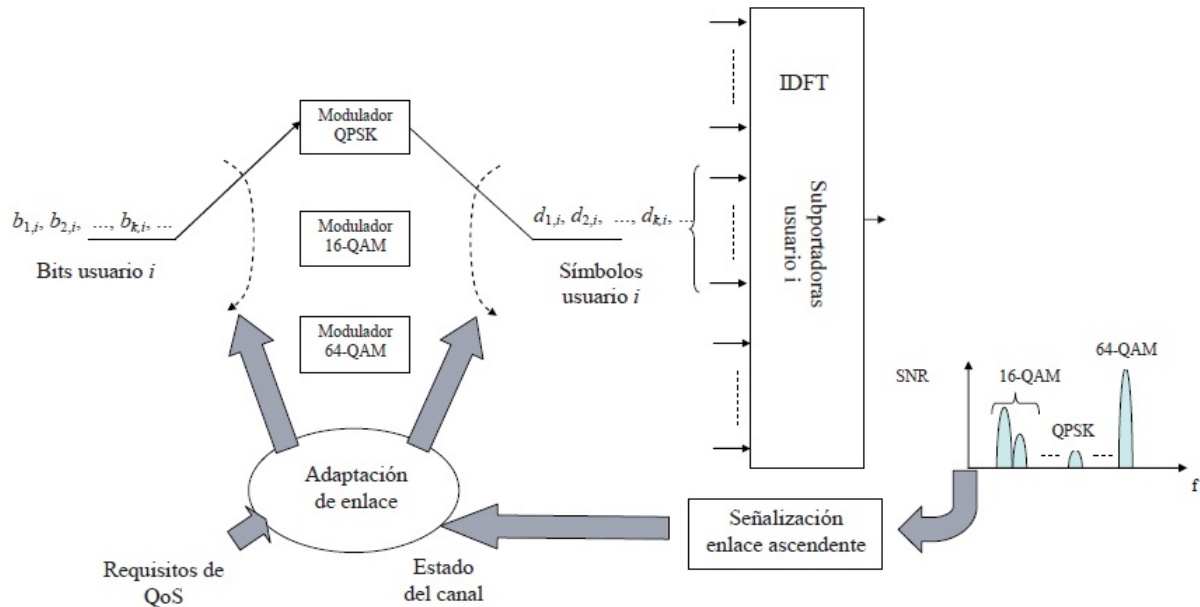
2.1.1.1. Modulación y codificación adaptativas. Procedimientos de RRM

Como se ha comentado anteriormente, en los sistemas OFDMA, el ancho de banda total se divide en diferentes subportadoras, con lo cual, el sistema debe de disponer de mecanismos de gestión capaces de decidir cómo se distribuyen los recursos entre los diferentes usuarios según sus requerimientos de Quality of Service (Calidad de Servicio) (QoS). Estos mecanismos forman parte de la denominada gestión de recursos radio o RRM. A continuación se va a realizar una pequeña descripción de cada uno de estos mecanismos:

- **Scheduling de paquetes:** Es el responsable de asignar las distintas subportadoras a los diferentes usuarios conectados al sistema en ese momento. Se debe resaltar que cabe la posibilidad de poder asignar varias subportadoras para los diferentes servicios que pudiera tener un mismo usuario. El scheduling de paquetes tendrá en cuenta tanto los requisitos de QoS, como la información del estado del canal de cada usuario para decidir cuantas y cuales subportadoras asigna a cada usuario y/o servicio. (véase figura 2.5).

Figura 2.5: *Scheduling de paquetes en OFDMA* [13]

- **Modulación Adaptativa (Adaptación de enlace):** Como los sistemas OFDMA no imponen a priori ninguna condición sobre el tipo de modulación que deben tener las diferentes subportadoras, la denominada modulación adaptativa o adaptación de enlace consiste en extraer el máximo rendimiento del canal mediante la selección de la modulación que permita enviar el mayor número de bits por símbolo ante unas condiciones de SNR dadas (véase figura 2.6).

Figura 2.6: *Adaptación de enlace en OFDMA* [13]

2.1.2. SC-FDMA

Como se ha comentado en la sección anterior, los altos valores de [PAPR](#) producidos al utilizar el esquema de transmisión [OFDMA](#), conlleva utilizar amplificadores de potencia altamente lineales para poder evitar la distorsión asociada a la intermodulación, para conseguir que un amplificador tenga amplia linealidad, este debe operar muy por debajo de su potencia de pico, lo se traduce en una eficiencia muy reducida. Este aspecto no es muy importante en el enlace descendente (DL), ya que en la estación de base, no son tan críticos ni la eficiencia ni el coste de los amplificadores. Sin embargo para el enlace ascendente (UL), esta peculiaridad se convierte en un gran problema que se debe solventar.

Es aquí cuando surgió la nueva técnica de acceso al medio de portadora única o *single carrier*, denominada Single Carrier Frequency Division Multiplexing Access (Acceso por Multiplexación por división en frecuencia única ([SC-FDMA](#))). En la técnica de acceso al medio [SC-FDMA](#) se han intentado conjugar los siguientes objetivos:

1. Conseguir una mayor eficiencia de los amplificadores de potencia, lo que se deberá traducir en unos valores de [PAPR](#) más reducidos.
2. Conseguir llevar a cabo mecanismos de ecualización en el dominio de la frecuencia de forma sencilla, ya que estos presentan una menor complejidad que la ecualización en el dominio temporal.
3. Conseguir poder variar de forma sencilla la asignación de ancho de banda de acuerdo con las diferentes necesidades de transmisión de los diferentes usuarios.

Para poder cumplir estos objetivos, el procedimiento SC-FDMA se ha basado en la anterior técnica OFDMA, solo que ahora, se debe utilizar una precodificación DFT de los símbolos, en lugar de asignar símbolos a cada subportadora, gracias a esta precodificación DFT, se consigue reducir las variaciones en la potencia instantánea (véase figura 2.7).

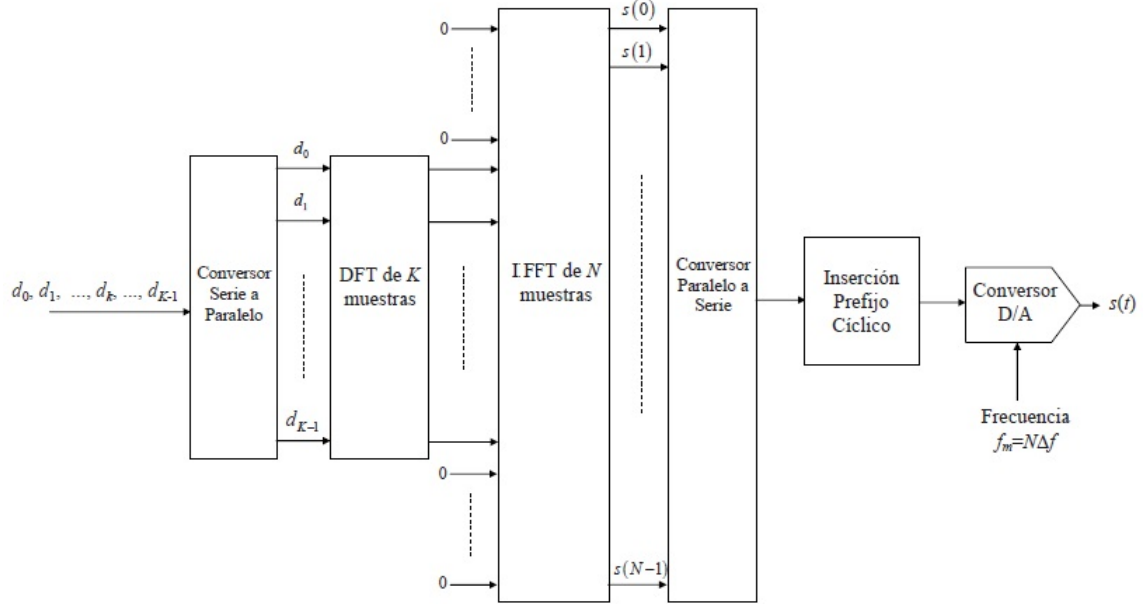


Figura 2.7: Transmisión de la señal SC-FDMA [13]

En la figura 2.8 se puede observar de forma clara, la diferencia entre las dos técnicas de acceso al medio utilizadas por los sistemas LTE.

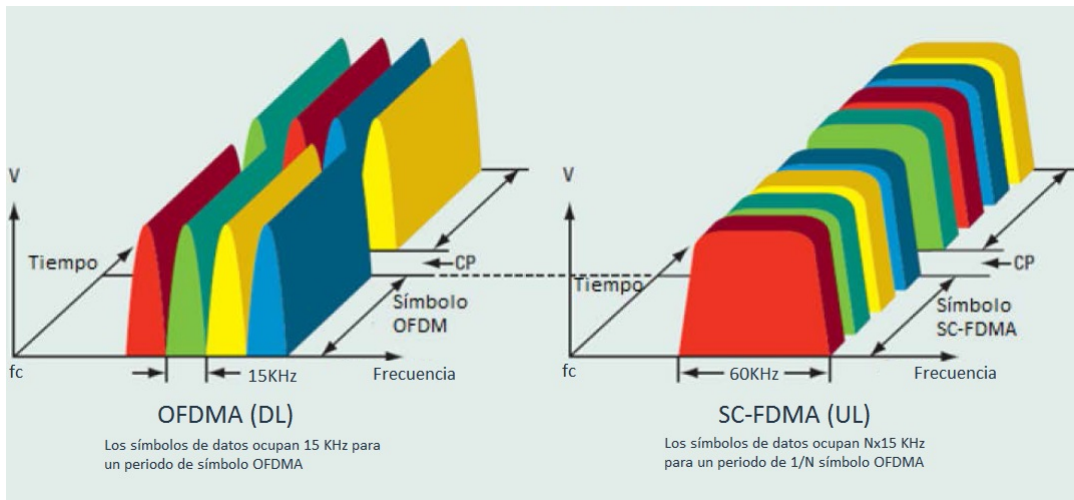


Figura 2.8: OFDMA vs SC-FDMA. [12]

2.2. Interfaz y arquitectura radio

La interfaz y la arquitectura radio de los sistemas [LTE](#) sufrieron una simplificación respecto a la anterior generación. Los sistemas [LTE](#) tienen como nueva arquitectura de red la llamada Evolved Packet System (Sistema de paquetes evolucionado) ([EPS](#)), la cual, es la evolución del sistema de [UMTS](#) completo: acceso radio (U-TRAN), red core de paquetes (Packet Core) y su integración con redes existentes ya sean 3GPP o no.

La nueva arquitectura EPS comprende:

- ***Evolved Packet Core (Red de paquetes evolucionada) ([EPC](#)):***

EPC es la evolución del core network de la anterior generación [UMTS](#), esta nueva red se hace más plana y elimina tipo de nodos integrando su funcionalidad. Además, realiza una separación entre el tráfico de usuario y de control, ya que el tráfico de usuario crece en función de los servicios y tipos de aplicaciones, mientras que el tráfico de control crece con el número de usuarios.

- ***Red de acceso radio LTE ([E-UTRAN](#)):***

La red de Acceso Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (Red de Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionada) ([EUTRAN](#)) es la evolución del acceso radio de [UMTS](#). En esta nueva red se consigue disminuir el número de elementos integrando las funcionalidades del antiguo Nodo B y Radio Network Controller (Controlador de Sistema Radio) ([RNC](#)) en un único y nuevo tipo de nodo llamado Evolved Node B (Nodo B evolucionado) ([eNB](#)). Gracias a este nuevo nodo se consigue una gran reducción del coste y la complejidad de los equipos.

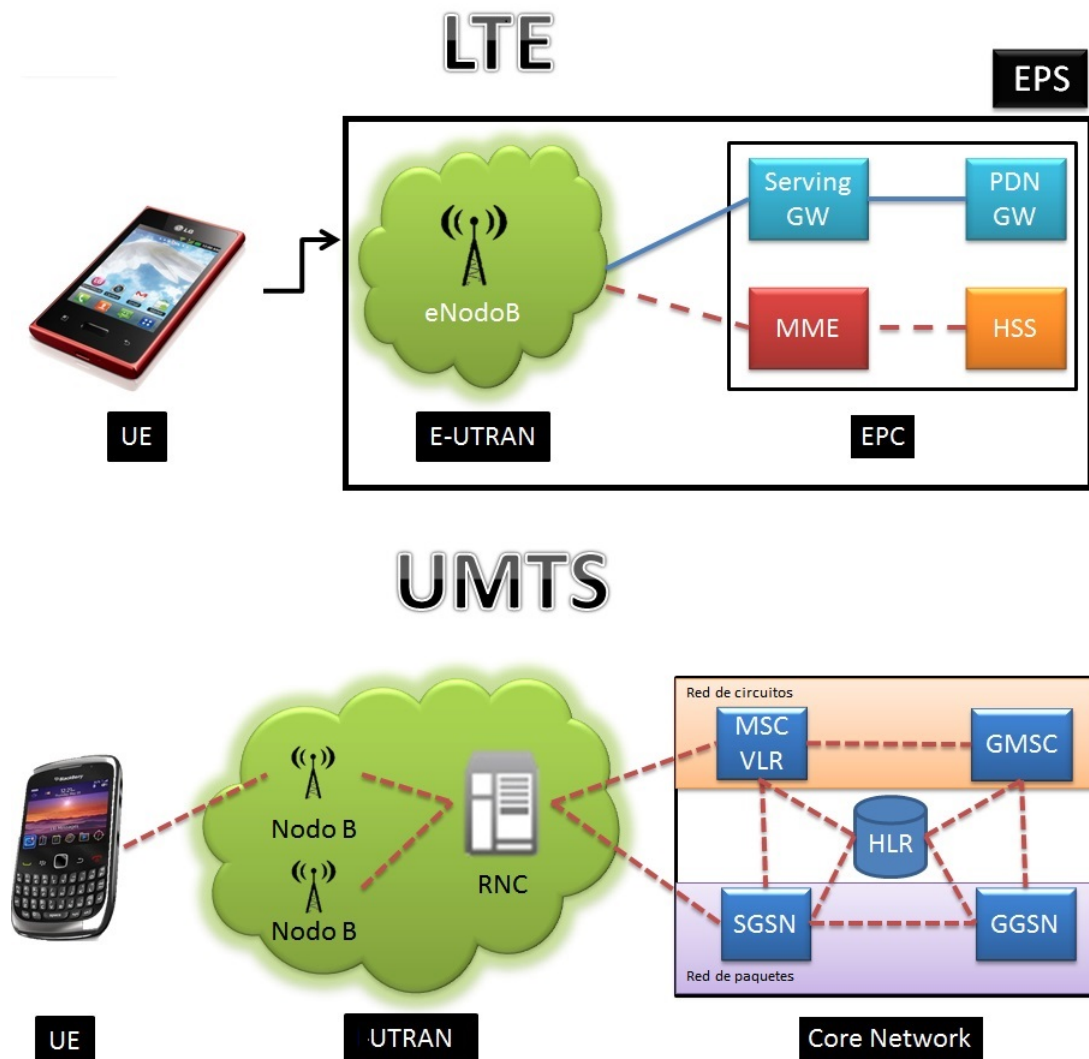


Figura 2.9: Comparación de las arquitecturas de red LTE vs UMTS

Sincronización y Búsqueda de Celda

3.1. Introducción

El primer paso que debe llevar a cabo un terminal (UE) que desea conectarse a una red LTE, se conoce con el nombre de “*Búsqueda de celda*”. En los sistemas LTE este procedimiento es complejo y con una gran carga computacional. Durante el proceso, el UE comprueba cuál de las señales procedentes de las distintas estaciones bases (eNB) llega con mayor calidad, para así poder llevar a cabo el proceso de sincronización y lograr detectar la Identidad de Celda (Cell-ID). Un terminal solamente es capaz de poder realizar una llamada o establecer una conexión de datos tras haber realizado con éxito los procesos de búsqueda de celda y registro en la red. Este procedimiento se realiza de forma periódica cada vez que un terminal quiera actualizar la red a la que está conectado o quiera encontrar una nueva celda con la que realizar un handover¹.

En la capa física, el procedimiento de búsqueda de celda sigue una serie de pasos mediante los cuales el User Equipment (Equipo de Usuario) (UE) determina diferentes parámetros como son:

- La temporización temporal de los símbolos y la trama.
- La sincronización de la frecuencia portadora.
- La sincronización del reloj de muestreo.

¹Sistema utilizado en comunicaciones móviles con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones

- La Identidad de Celda ([Cell-ID](#)).

Gracias a todos estos parámetros detectados por el [UE](#), este es capaz de demodular tanto el canal Physical Broadcast Channel (Canal Físico de Broadcast) ([PBCH](#)), como el Physical Downlink Shared Channel (Canal compartido del Enlace físico descendente) ([PDSCH](#)), para poder recibir el resto de parámetros de información del sistema:

- Del [PBCH](#) se obtiene la Master Information Block (Bloque Master de Información) ([MIB](#)) de la cual consigue:
 - Información sobre la canalización (Ancho de banda de transmisión total utilizado en la celda).
 - Configuración del Physical HARQ Indicator Channel (Canal Indicador HARQ físico) ([PHICH](#)).
 - Número de antenas de transmisión.
 - Tipo de Prefijo Cíclico (Cyclic Prefix) ([CP](#)).
 - Señales de referencia.
 - System Frame Number (Numero de trama del sistema) ([SFN](#)).
- Del [PDSCH](#) se obtiene los System Information Blocks (Bloque de Información de Sistema) ([SIBs](#))² de los cuales consigue:
 - Información sobre el operador de la celda.
 - Identidad de la celda.
 - Código del área de localización.
 - Nivel de recepción mínimo requerido.
 - Ubicación temporal (Time-scheduling) de los restantes [SIBs](#).

Antes de poder simular el proceso de sincronización y búsqueda de celda, se deben de generar las diferentes señales transmitidas por el transmisor, en este caso el [eNB](#), para que el terminal o receptor sea capaz de detectarlas y sincronizarse con el transmisor.

²véase Anexo [B](#)

En este proyecto se va a simular el canal descendente (Downlink) de un sistema de cuarta generación **LTE**. Como se ha comentado anteriormente, este canal descendente utiliza como técnica de acceso múltiple la tecnología **OFDMA** (véase Capítulo **2.1.1**).

3.2. Estructura del Slot y Recursos Elementales Físicos

3.2.1. Organización tiempo-frecuencia

En **OFDMA**, a los usuarios se les asigna un número específico de subportadoras para una cantidad de tiempo determinada. La señal transmitida por el enlace descendente consta de $N_{RB}^{DL} \times N_{sc}^{RB}$ subportadoras para una duración de N_{ymb}^{DL} símbolos OFDM. Esta señal puede ser representada por una rejilla de recursos tal como se representa en la Figura 3.1

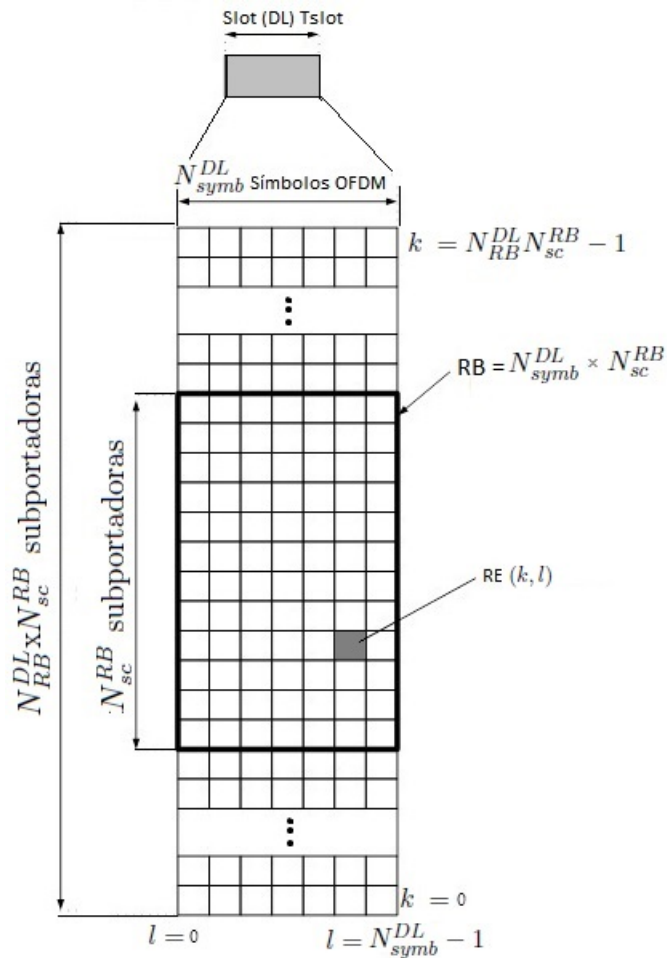


Figura 3.1: *Rejilla de Recursos del Downlink*[1].

Cada elemento fundamental de la rejilla de recursos para el puerto de antena p se denomina **RE** y se identifica de forma única por el par de índices (k, l) en un slot, donde $k = 0, \dots, N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} - 1$ y $l = 0, \dots, N_{sybm}^{DL} - 1$ son los índices en los dominios de tiempo y frecuencia respectivamente.

La cantidad de N_{RB}^{DL} usados en el enlace descendente depende del ancho de banda de transmisión y del tipo de **CP** configurado en la celda **LTE** correspondiente, este valor deberá cumplir la siguiente ecuación:

$$N_{RB}^{min,DL} \leq N_{RB}^{DL} \leq N_{RB}^{max,DL} \quad (3.1)$$

Donde el valor $N_{RB}^{min,DL} = 6$ y el valor $N_{RB}^{max,DL} = 110$ son el menor y mayor ancho de banda soportado según el estándar del 3GPP TS 36.211[1].

Las especificaciones LTE[1] definen parámetros para anchos de banda del sistema que varían entre 1,25 MHz y 20 MHz como se muestra en la Tabla 3.1

Ancho de Banda(MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Frecuencia Muestreo(MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de Resource Block (Bloque de Recursos) (RB)s	6	15	25	50	75	100
Número de Subportadoras (Ns)	72	180	300	600	900	1200

Tabla 3.1: Tabla de parámetros según ancho de banda

Los **RE** en el puerto de antena p , se corresponden al valor complejo $a_{k,l}^p$. Durante la realización de este proyecto, se va a simular la utilización de un único puerto de antena, por lo tanto, el índice p se puede eliminar quedando la nomenclatura de la rejilla de recursos como $a_{k,l}$.

A la mínima cantidad de recursos asignables por usuario se le conoce con el nombre de Resource Block (Bloque de Recursos) (**RB**). Los **RB**'s se utilizan para describir la asignación de ciertos canales físicos a los Resource Element (Elemento de Recursos) (**RE**).

Se pueden diferenciar dos tipos de **RB** según su definición:

- Physical Resource Block (Bloque de Recursos Físicos) (**PRB**): véase sección 3.2.1.1
- Virtual Resource Block (Bloque de Recursos Virtuales) (**VRB**): véase sección 3.2.1.2

3.2.1.1. Physical Resource Block (Bloque de Recursos Físicos) (PRB)

Un PRB se define como N_{sym}^{DL} símbolos OFDM consecutivos en el dominio del tiempo y N_{sc}^{RB} subportadoras consecutivas en el dominio de la frecuencia. Un PRB consiste en $N_{sym}^{DL} \cdot N_{sc}^{RB}$ RE's, lo que corresponde a un slot en el dominio del tiempo y de $180kHz$ en el dominio de la frecuencia, es decir, 12 subportadoras consecutivas por una ranura ($0,5ms$) de duración. Un PRB se considera como el mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil.

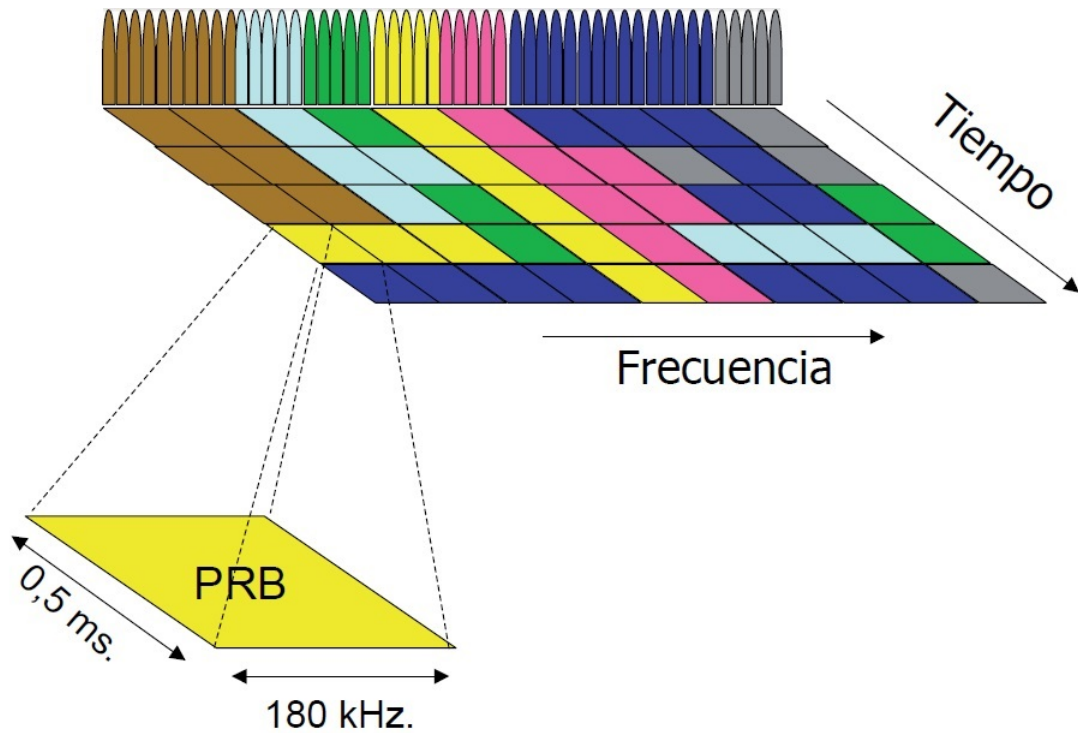


Figura 3.2: Concepto de PRB (Physical Resource Block)[13].

Los PRB están numerados de 0 a N_{RB}^{DL} en el dominio de la frecuencia. La relación entre el número de PRB en el dominio de la frecuencia (n_{PRB}) y los RE(k, l) en un slot está dada por:

$$n_{PRB} = \left\lfloor \frac{k}{N_s^{RB_c}} \right\rfloor \quad (3.2)$$

3.2.1.2. Virtual Resource Block (Bloque de Recursos Virtuales) (VRB)

El mapeo de los VRB a bloques de PRB para el enlace descendente permite la transmisión en el dominio de la frecuencia. Esta distribución consta de dos pasos:

1. Una asignación de pares de VRB a pares PRB de tal manera que, pares VRB consecutivos no se asignan a la frecuencia consecutiva de pares PRB.
2. Una fracción de cada par de RB's de tal manera que, los dos RB's se transmiten con una cierta diferencia de frecuencia en el medio. El segundo paso puede ser visto como salto de frecuencia sobre una base de ranura.

3.3. Estructura de Trama

El tamaño de los diversos campos en el dominio del tiempo se expresa como un número de unidades de tiempo $T_s = 1/(15000 \cdot 2048)$. Esta unidad de tiempo se considera la unidad básica de medida.

Tanto el Downlink como el Uplink se dividen en tramas radio, las cuales tienen una duración de $T_f = 307200 \cdot T_s = 10ms$. Según el estándar del 3GPP[1], existen dos tipos de estructuras de trama.

1. **Tipo 1:** Trama valida si el sistema utiliza Frequency-Division Duplexing (Multiplexación por división en frecuencia) (FDD)
2. **Tipo 2:** Trama valida si el sistema utiliza Time-Division Duplexing (Multiplexación por división en tiempo) (TDD)

Este proyecto se ha decantado por el uso de la tecnología Frequency-Division Duplexing (Multiplexación por división en frecuencia) (FDD), ya que actualmente es la más usada por la mayoría de los operadores móviles del mundo. Con lo cual, queda como futura mejora la simulación de la tecnología TDD, ya que en un futuro cercano, el mercado de las comunicaciones está pensado implementar sistemas híbridos que hagan uso de ambas tecnologías.

La tecnología FDD elegida para el presente proyecto se basa en la utilización de varias zonas del espectro, es decir, el DL (DownLink) y el UL (UpLink) operan a diferentes frecuencias.

3.3.1. Estructura de Trama Tipo 1

Como se ha especificado en el apartado anterior, la estructura de trama tipo 1 es la utilizada si el sistema se basa en la tecnología **FDD**. En este tipo de estructura, cada trama tiene una duración de $Tf = 307200 \cdot Ts = 10\text{ms}$, además esta se divide en 10 subtramas de 1ms de duración y estas a su vez en dos slots o ranuras de 0,5mseg de duración (véase figura 3.3). Dentro de cada slot se pueden tener 6 o 7 símbolos dependiendo de si el sistema utiliza un **CP** normal o un **CP** extendido. La utilización de un Prefijo Cíclico (Cyclic Prefix) (**CP**) sirve para mitigar los efectos de las múltiples reflexiones que afectan a la señal al ser transmitida por un canal.

- **CP normal** : Es el prefijo cíclico usado normalmente para las comunicaciones de los sistemas de cuarta generación. Este tipo de **CP** se utiliza cuando se tiene una separación entre portadoras de 15 kHz, esta separación entre subportadoras es un compromiso entre la sobrecarga que añade el **CP** y la sensibilidad a desplazamientos de frecuencia. Una separación entre subportadoras de 15 kHz es lo suficientemente grande como para permitir una alta movilidad y evitar la necesidad de realizar ajustes de frecuencia en lazo cerrado. Cuando se utiliza un **CP** normal, en cada slot se tendrán 7 símbolos OFDM (véase figura 3.3).

Cabe destacar que la longitud del **CP** es diferente para cada símbolo OFDM del slot. El primer símbolo OFDM de cada slot tendrá un **CP** de $5,21\mu\text{seg}$ de longitud, mientras que el resto de símbolos del slot tendrán una longitud de $4,69\mu\text{seg}$.

- **CP extendido** : Este prefijo cíclico tiene una longitud aproximada de $17\mu\text{s}$, que es aproximadamente $1/4$ de la longitud total de un símbolo OFDM. Esto garantiza que, incluso en las grandes celdas suburbanas y rurales, la dispersión del retardo se encuentre contenida dentro del **CP**. No obstante, esto se logra a costa de una mayor sobrecarga del **CP** en proporción a los recursos totales de transmisión del sistema. Este tipo de **CP** es particularmente útil para el modo Multicast-Broadcast over Single-Frequency Network (Red Multicast-Broadcast sobre frecuencia única) (**MBSFN**), es decir, el modo en el que el UE recibe y combina señales sincronizadas de múltiples celdas adyacentes. En este caso, las compensaciones de temporización relativa de las múltiples celdas deben ser recibidas en el receptor dentro de la duración del **CP**. Como es la Interferencia Intersimbólica (**ISI**) lo que se quiere evitar, la longitud del **CP** debe ser larga y por lo tanto solo tendremos 6 símbolos OFDM por cada slot (véase figura 3.4).

Durante la realización de este proyecto, se ha decidido utilizar un prefijo cíclico normal ya que es el más usado en la mayoría de las comunicaciones actuales y además no se pretende simular el modo MBSFN. En las siguientes figuras se muestran las diferentes estructuras de trama existentes dependiendo de si el sistema utiliza un CP normal (véase figura 3.3) o si el sistema utiliza un CP extendido (véase figura 3.4).

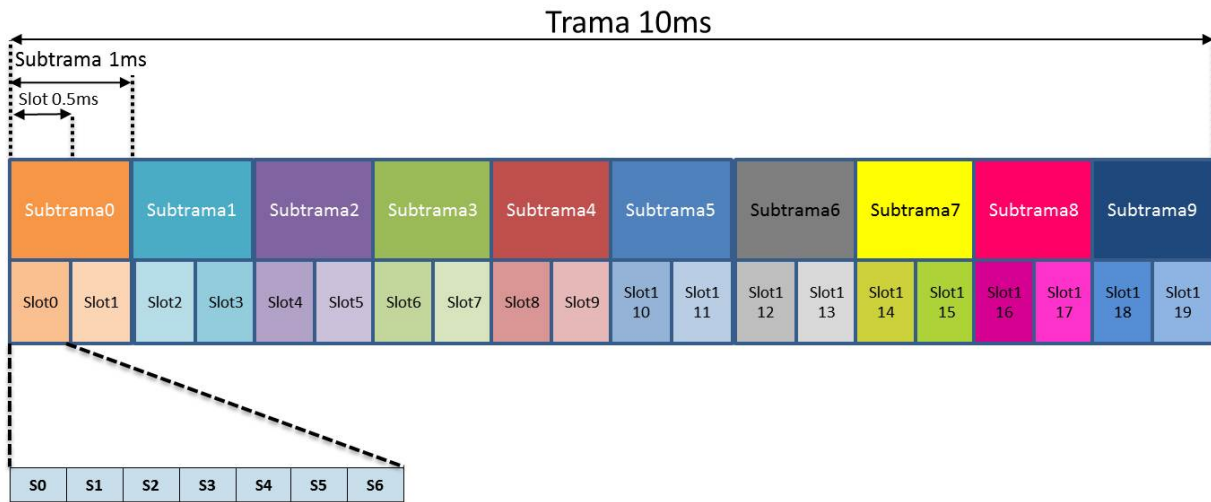


Figura 3.3: Estructura de Trama tipo 1 con CP normal

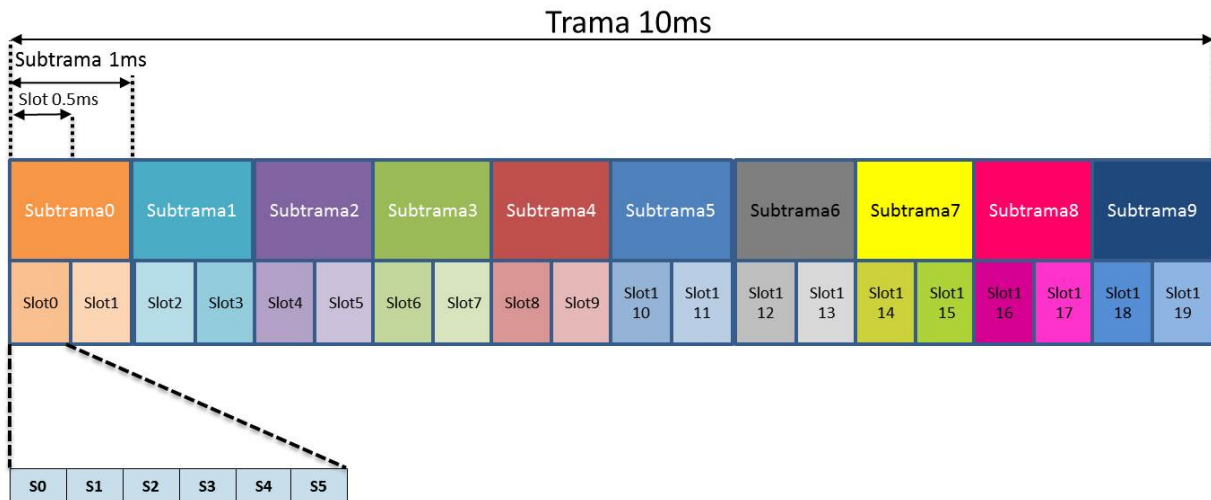


Figura 3.4: Estructura de Trama tipo 1 con CP extendido

Generación de Señales de Sincronismo y de Referencia

4.1. Introducción

En este capítulo se van a describir las principales características de las señales físicas que permiten al terminal móvil sincronizarse con el sistema y poder demodular coherentemente el canal [PBCH](#) y recibir el resto de parámetros necesarios para poder conectarse a la red [LTE](#).

Tanto el canal de sincronización [PDSCH](#), como el canal de broadcast [PBCH](#) son necesarios a la hora de realizar la búsqueda de celda. El canal de transmisión [PDSCH](#) tiene diferentes modos de transmisión dependiendo del tipo de [MIMO](#) que se desee utilizar en el sistema (véase Apéndice [A.1](#)). Durante la realización del presente proyecto, se ha elegido el modo de transmisión 1, es decir, se va a simular una sola antena con un único puerto ($p = 0$). Se ha elegido este tipo de transmisión porque se quiere evitar la gran complejidad matemática que implicaría incluir el uso de varias antenas o puertos, además, se ha buscado el poder realizar una simulación lo más realista posible, ya que actualmente la gran mayoría de terminales cuenta con una única antena. Además de la característica anteriormente nombrada, en este sistema [LTE](#) se va a simular la utilización de un [CP](#) corto y tecnología [FDD](#) como se ha comentado en el apartado anterior.

En resumen, el sistema que se va a simular en el presente proyecto es un sistema [LTE](#) que utiliza [FDD](#) como técnica de duplexación, un único puerto de antena ($p = 0$) y un [CP](#) corto.

4.2. Generación de Rejilla de Recursos

El primer paso que se va a simular en el transmisor es la implementación de la rejilla de recursos utilizada por el sistema explicada en el capítulo 3.2.1. Esta rejilla viene especificada en el estándar del 3GPP[1] sección 6.2.2 de la siguiente forma:

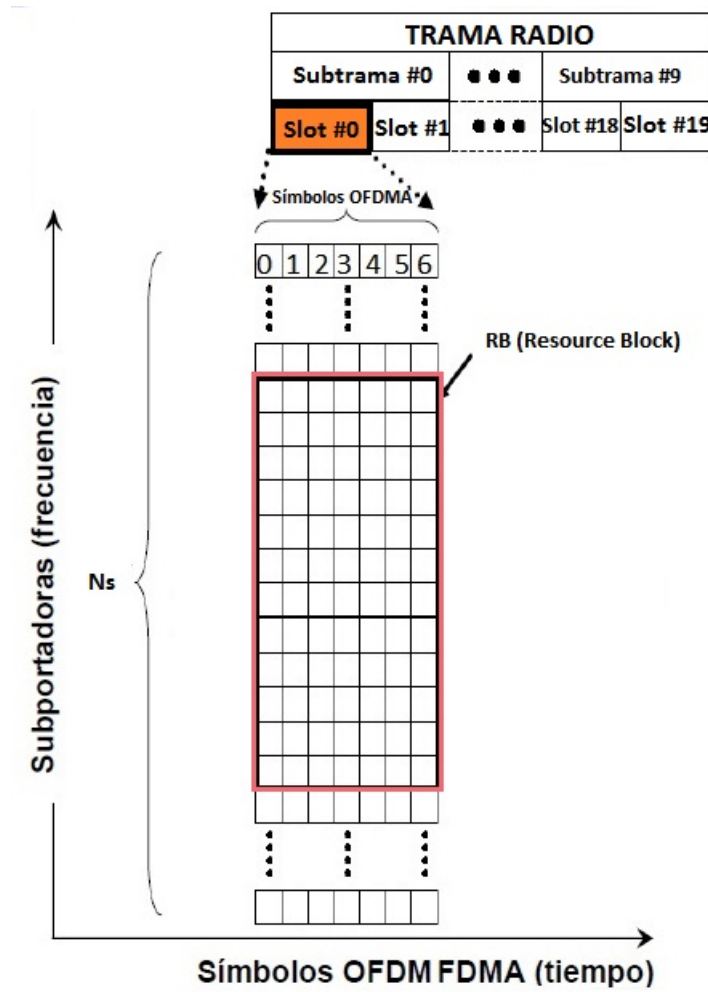


Figura 4.1: Rejilla de Recursos generada en el transmisor [12]

El tamaño de la rejilla de recursos varía dependiendo del ancho de banda seleccionado por el usuario (ver Tabla 3.1). En el caso elegido para el presente proyecto, al estar utilizando un CP corto, siempre se tendrán 7 símbolos OFDMA por cada slot de la trama radio. Una vez que se tiene implementada dicha rejilla, ya se dispone de la base donde poder transportar las diferentes señales físicas del enlace descendente del sistema LTE.

4.3. Identidad de Celda

El estándar [LTE](#) define un total de 504 identidades de celda únicas llamadas N_{id}^{cell} , estas identidades de celda están definidas a partir de secuencias de tipo Gold ¹ de longitud 31.

Estas 504 secuencias distintas se agrupan formando 168 grupos únicos de tres secuencias, donde cada grupo corresponde a un [eNB](#) distinto. Se necesitan 504 secuencias ya que está permitida la sectorización de los [eNB](#), es decir, se han supuesto un total de 168 identidades distintas de [eNB](#), como a su vez, cada [eNB](#) se divide en tres sectores, se precisan un total de 504 secuencias distintas para identificar las celdas ($168 \cdot 3 = 504$).

Según lo descrito anteriormente, el orden del patrón de reutilización utilizado para los sistemas de 4ª Generación [LTE](#) es 3 (3 sectores por [eNB](#)). Un ejemplo claro sería el mostrado en la siguiente figura:



Figura 4.2: *Ejemplo de un patrón de Reutilización 3*

¹véase Apéndice [C.2](#)

La identidad de celda se genera como $N_{id}^{cell} = 3 \cdot N_{id}^1 + N_{id}^2$

- Donde N_{id}^1 toma valores entre 0 y 167 (identidades distintas de eNB)
- Donde N_{id}^2 toma valores entre 0 y 2 (sectores por eNB)

Al poder agrupar las identidades de celdas, se reduce el número de detecciones de correlación que se deben de realizar en el receptor. Por lo tanto, la táctica utilizada en este proyecto será primero detectar N_{id}^2 (solo 3 correlaciones), y a partir de aquí, sólo debemos correlar las secuencias N_{id}^1 pertenecientes al N_{id}^2 encontrado (un total de 168 correlaciones).

Una vez que se hayan generado los valores de N_{id}^{cell} , N_{id}^1 y N_{id}^2 , ya se puede llevar a cabo la implementación de las señales físicas del enlace descendente.

4.4. Señales Físicas del Enlace Descendente

Una señal física de enlace descendente se corresponde con un conjunto de RE's usados por la capa física que no llevan información procedente de las capas superiores. Estas señales sirven para facilitar la implementación de los mecanismos físicos que se llevan a cabo para la detección de las señales OFDMA moduladas propias del enlace descendente de un sistema LTE.

Se definen las siguientes señales físicas:

1. Señal Sincronización.
2. Señal de Referencia.

4.4.1. Señales de Sincronización

En **LTE**, cada celda esta sincronizada con las celdas adyacentes a ella, es decir, las tramas de cada celda de un mismo **eNB** se inician coincidiendo en tiempo para así poder obtener beneficios de sincronización para redes como **MBSFN** y mejorar la gestión de la interferencia entre celdas.

La señal de sincronización **SCH** se utiliza para facilitar los procesos de sincronización a nivel de trama y subtrama del sistema. Esta señal según el estándar de **LTE** [1] se divide en dos tipos de señales, la llamada Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**) y Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**). Ambas señales de sincronización se mapean en las 72 portadoras centrales (62 de datos y 10 de guarda) simétricamente colocadas alrededor de la frecuencia portadora (DC). Estas señales de sincronización se transmiten en los últimos dos símbolos **OFDM** de las subtramas 0 y 5, es decir, se transmiten multiplexados en el tiempo y con una periodicidad de dos veces la trama (cada $5ms$).

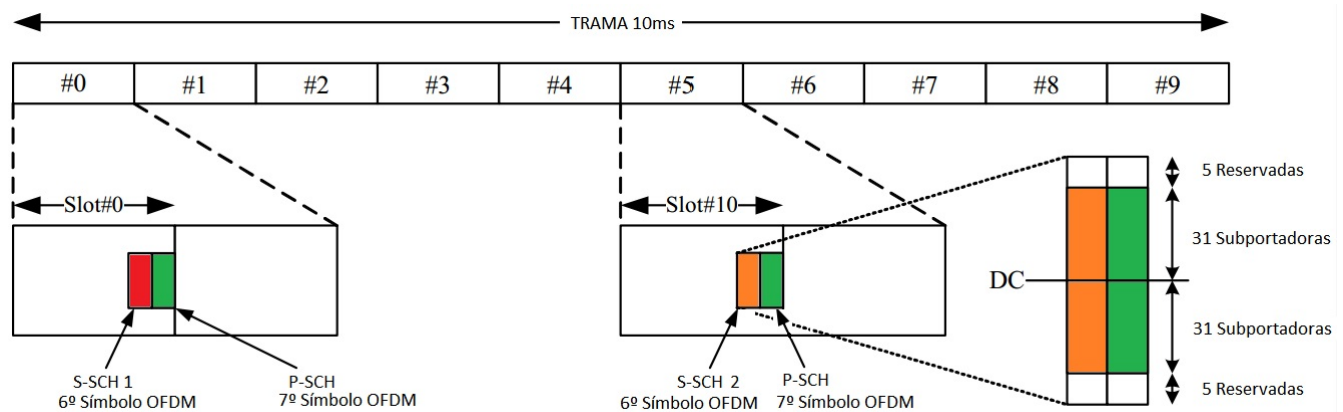


Figura 4.3: Estructura de Trama tipo 1 (modo FDD)[8]

Las señales de sincronización se sitúan en el centro del radiocanal, de esta forma se facilita la sincronización de los terminales móviles a la red independientemente de cual sea el número de subportadoras que utilicen, es decir, independientemente del ancho de banda (entre 1.4MHz y 20MHz) asignado al terminal. Esta característica es muy importante, ya que en **LTE** la asignación del ancho de banda es flexible y puede cambiar a lo largo del tiempo.

Además, como al conectar el terminal móvil, el primer paso que éste realiza es el procedimiento de sincronización y adquisición inicial de parámetros, las señales de sincronización, tanto **P-SCH** como **S-SCH**, se detectarán en primer lugar, para una vez que se halla detectado la identidad de celda ($N_{id-Cell}$), esta se pueda utilizar para demodular las señales de referencia específicas de celda y así poder conocer el resto de parámetros del sistema.

4.4.1.1. Señal de Sincronización Primaria

La Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**) permite la sincronización temporal a nivel de subtrama, este procedimiento se realiza mediante la correlación entre la señal recibida y una secuencia de referencia almacenada en el receptor (véase Capítulo 5).

La señal **P-SCH** consiste en tres secuencias de Zadoff-Chu² en el dominio de la frecuencia, estas secuencias tienen una longitud de 63 muestras a las que se le ha eliminado la muestra central (longitud 62). Las tres secuencias se generan de tal manera que sean ortogonales entre sí (propiedad de las secuencias Zadoff-Chu), ya que cada una de las secuencias se corresponde con cada uno de los valores que puede tomar N_{id}^2 . El uso de las secuencias de Zadoff-Chu viene motivado por la gran probabilidad de detección y al mismo tiempo baja probabilidad de falsa alarma que tienen este tipo de secuencias.

La señal **P-SCH** se transmite utilizando las 62 subportadoras centrales de la banda seleccionada por el sistema, dejando sin ocupar la frecuencia portadora (DC), además, para separar y evitar interferencias con otras señales, se dejan 5 subportadoras de guarda tanto a la derecha como a la izquierda de la señal **P-SCH** (véase Figura 4.3).

²véase ApéndiceC.1

4.4.1.1.1. Secuencia de Generación : La Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**) se genera de la siguiente forma:

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{j\frac{\pi u n(n+1)}{63}} & \text{si } n=0,1,\dots,30 \\ e^{-j\frac{\pi u(n+1)(n+2)}{63}} & \text{si } n=31,32,\dots,61 \end{cases} \quad (4.1)$$

Donde u viene definido dependiendo del valor que tenga el parámetro N_{id}^2 como muestra la siguiente Tabla 4.1:

N_{id}^2	Valor de u
0	25
1	29
2	34

Tabla 4.1: Tabla del parámetro u en función de N_{id}^2

4.4.1.1.2. Mapeo de Recursos : Una vez que la Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**) ha sido generada, se debe mapear dicha señal en la rejilla de recursos generada anteriormente en el apartado 4.2. Este mapeo dependerá del tipo de trama que haya sido elegida por el transmisor **eNB**. El receptor o **UE** no deberá asumir que la Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**) se transmite en el mismo puerto de antena que cualquiera de las señales de referencia del enlace descendente o que cualquier otro ejemplo de transmisión de la Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**).

La secuencia generada por la ecuación 4.1 se mapeará de la siguiente forma:

$$a_{k,l} = d(n) \quad n=0,1,\dots,61 \quad (4.2)$$

$$k = n - 31 + \frac{N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}}{2}$$

Donde k es la subportadora y l es el símbolo OFDMA. Para el modo **FDD** y la estructura de trama tipo 1, la Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**) se mapea en el último símbolo OFDMA de los slots 0 y 10 (subtrama 0 y 5), tal y como se muestra en la figura 4.3.

Cabe destacar que la señal se transmite de forma repetida en los slots 0 y 10 para poder simplificar los handover. La señal **P-SCH** sólo podrá proporcionar al receptor la temporización de símbolo, pero no la temporización de trama, debido a la ambigüedad de la repetición de la misma señal **P-SCH** en ambos slots OFDMA. Esto se explicará con mayor detalle en el Capítulo 6.

En resumen, con la Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**) el receptor podrá estimar el valor de la identidad entre los 3 posibles valores, es decir, podrá estimar el valor de N_{id}^2 , además, gracias a conocer dónde va situada la señal, el receptor podrá también realizar una sincronización gruesa a nivel de símbolo.

4.4.1.2. Señal de Sincronización Secundaria

La Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**) sirve para poder llevar a cabo la sincronización temporal a nivel de trama, utilizando la misma metodología de correlación temporal llevada a cabo para la Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**).

La Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**) se genera utilizando secuencias de máxima longitud o m -sequences³ que siempre deben estar asociadas a una **P-SCH**. Las secuencias necesarias para generar el **S-SCH** se obtienen entrelazando en el dominio de la frecuencia una secuencia de longitud 31 con su correspondiente versión desplazada.

Como ya se comentó en el Apartado 4.4.1, la señal **S-SCH** también se transmite utilizando las 72 portadoras centrales (62 de datos y 5 a cada lado de guarda) disponibles en el ancho de banda asignado. Además, en el caso de utilizar el modo **FDD** con el tipo de trama 1, como en el presente proyecto, la Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**) se transmite utilizando los penúltimos símbolos de las subtramas 0 y 5 (slots 0 y 10) como se puede observar en la figura 4.3.

³véase Apéndice C.3

4.4.1.2.1. Secuencia de Generación : La señal **P-SCH** se utiliza para cifrar y generar la señal **S-SCH** realizando una concatenación de dos secuencias de longitud 31 como indica la siguiente ecuación:

$$d(2n) = \begin{cases} s_0^{m0}(n)c_0(n) & \text{si es para la subtrama 0} \\ s_1^{m1}(n)c_0(n) & \text{si es para la subtrama 5} \end{cases}$$

$$d(2n+1) = \begin{cases} s_1^{m1}(n)c_1(n)z_1^{m0}(n) & \text{si es para la subtrama 0} \\ s_0^{m0}(n)c_1(n)z_1^{m1}(n) & \text{si es para la subtrama 5} \end{cases}$$

Donde $0 \leq n \leq 30$.

Cabe destacar que la Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**) se genera de manera diferente dependiendo de si va a ir en la subtrama 0 o en la subtrama 5, gracias a esta peculiaridad, el receptor será capaz de llevar a cabo la sincronización a nivel de trama ya que podrá diferenciar entre el slot 0 y el slot 10.

Los índices m_0 y m_1 se generan dependiendo del valor que tenga el parámetro N_{id}^1 como indican las siguientes ecuaciones:

$$m0 = m' \bmod 31 \quad (4.3)$$

$$m1 = (m0 + \lfloor m'/31 \rfloor + 1) \bmod 31 \quad (4.4)$$

$$m' = N_{id}^1 + q(q+1)/2$$

$$q = \lfloor \frac{N_{id}^1 + q'(q'+1)/2}{30} \rfloor$$

$$q' = \lfloor N_{id}^1/30 \rfloor$$

Los posibles valores de m_0 como de m_1 se pueden observar en la tabla de la figura 4.4.

$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1	$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1	$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1	$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1	$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1
0	0	1	34	4	6	68	9	12	102	15	19	136	22	27
1	1	2	35	5	7	69	10	13	103	16	20	137	23	28
2	2	3	36	6	8	70	11	14	104	17	21	138	24	29
3	3	4	37	7	9	71	12	15	105	18	22	139	25	30
4	4	5	38	8	10	72	13	16	106	19	23	140	0	6
5	5	6	39	9	11	73	14	17	107	20	24	141	1	7
6	6	7	40	10	12	74	15	18	108	21	25	142	2	8
7	7	8	41	11	13	75	16	19	109	22	26	143	3	9
8	8	9	42	12	14	76	17	20	110	23	27	144	4	10
9	9	10	43	13	15	77	18	21	111	24	28	145	5	11
10	10	11	44	14	16	78	19	22	112	25	29	146	6	12
11	11	12	45	15	17	79	20	23	113	26	30	147	7	13
12	12	13	46	16	18	80	21	24	114	0	5	148	8	14
13	13	14	47	17	19	81	22	25	115	1	6	149	9	15
14	14	15	48	18	20	82	23	26	116	2	7	150	10	16
15	15	16	49	19	21	83	24	27	117	3	8	151	11	17
16	16	17	50	20	22	84	25	28	118	4	9	152	12	18
17	17	18	51	21	23	85	26	29	119	5	10	153	13	19
18	18	19	52	22	24	86	27	30	120	6	11	154	14	20
19	19	20	53	23	25	87	0	4	121	7	12	155	15	21
20	20	21	54	24	26	88	1	5	122	8	13	156	16	22
21	21	22	55	25	27	89	2	6	123	9	14	157	17	23
22	22	23	56	26	28	90	3	7	124	10	15	158	18	24
23	23	24	57	27	29	91	4	8	125	11	16	159	19	25
24	24	25	58	28	30	92	5	9	126	12	17	160	20	26
25	25	26	59	0	3	93	6	10	127	13	18	161	21	27
26	26	27	60	1	4	94	7	11	128	14	19	162	22	28
27	27	28	61	2	5	95	8	12	129	15	20	163	23	29
28	28	29	62	3	6	96	9	13	130	16	21	164	24	30
29	29	30	63	4	7	97	10	14	131	17	22	165	0	7
30	0	2	64	5	8	98	11	15	132	18	23	166	1	8
31	1	3	65	6	9	99	12	16	133	19	24	167	2	9
32	2	4	66	7	10	100	13	17	134	20	25			
33	3	5	67	8	11	101	14	18	135	21	26			

Figura 4.4: Tabla de mapeo entre $N_{ID}^{(1)}$ y los índices m_0 y m_1 [1]

Las secuencias $s_0^{m_0}(n)$ y $s_1^{m_1}(n)$ se generan utilizando dos m – secuencias cíclicas distintas de acuerdo a:

$$s_0^{m_0}(n) = \tilde{s}((n + m_0) \bmod 31)$$

$$s_1^{m_1}(n) = \tilde{s}((n + m_1) \bmod 31)$$

donde $\tilde{s}(i) = 1 - 2x(i)$, $0 \leq i \leq 30$, donde x se define como:

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 2) + x(\bar{i})) \bmod 2$$

donde $0 \leq \bar{i} \leq 25$ y con las condiciones iniciales $x(0) = 0, x(1) = 0, x(2) = 0, x(3) = 0, x(4) = 1$.

Las dos secuencias de cifrado $c_0(n)$ y $c_1(n)$, dependen de la señal [P-SCH](#) y están definidas mediante dos m – *secuencias* cíclicas $\tilde{c}(n)$ de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$c_0(n) = \tilde{c}((n + N_{ID}^2) \bmod 31)$$

$$c_1(n) = \tilde{c}((n + N_{ID}^2 + 3) \bmod 31)$$

donde el valor $N_{ID}^2 \in \{0, 1, 2\}$, es el valor de la identidad de celda y $\tilde{c}(i)$ está definido como:

$$\tilde{c}(i) = 1 - 2x(i), 0 \leq i \leq 30$$

donde $x(i)$ se genera siguiendo la siguiente secuencia:

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 3) + x(\bar{i})) \bmod 2, 0 \leq \bar{i} \leq 25$$

teniendo x las siguientes condiciones iniciales $x(0) = 0, x(1) = 0, x(2) = 0, x(3) = 0, x(4) = 1$.

Las dos secuencias de cifrado $z_1^{m0}(n)$ y $z_1^{m1}(n)$ están definidas mediante una m – *secuencias* cíclicas $\tilde{z}(n)$ de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$z_1^{m0}(n) = \tilde{z}((n + m_0 \bmod 8) \bmod 31)$$

$$z_1^{m1}(n) = \tilde{z}((n + m_1 \bmod 8) \bmod 31)$$

donde los valores m_0 y m_1 son los valores calculados en las ecuaciones [4.3](#) y [4.4](#) respectivamente.

$\tilde{z}(i)$ viene definido por la siguiente ecuación:

$$\tilde{z}(i) = 1 - 2x(i), 0 \leq \bar{i} \leq 30$$

donde $x(\bar{i})$ se genera como:

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 4) + x(\bar{i} + 2) + x(\bar{i} + 1) + x(\bar{i})) \bmod 2, 0 \leq \bar{i} \leq 25$$

teniendo x las siguientes condiciones iniciales $x(0) = 0, x(1) = 0, x(2) = 0, x(3) = 0, x(4) = 1$.

4.4.1.2.2. Mapeo de Recursos : Una vez que la Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**) ha sido generada correctamente, esta se debe mapear dentro de la rejilla de recursos generada anteriormente en el apartado 4.2. Este mapeo dependerá del tipo de trama que haya sido elegida por el transmisor **eNB**. Como se comentó anteriormente, en el presente proyecto se ha optado por utilizar un sistema tipo **FDD** con tramas tipo 1, y por lo tanto, la señal **S-SCH** se mapea dentro de la rejilla de recursos acorde a la siguiente ecuación:

$$a_{k,l} = d(n) \quad n=0,1,\dots,61 \quad (4.5)$$

$$k = n - 31 + \frac{N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}}{2}$$

$$l = N_{sym}^{DL} - 1; \text{ en slot 0 y 10 si estructura de trama tipo 1}$$

Cabe destacar que al contrario que para la señal **P-SCH**, en la señal **S-SCH** se generan dos secuencias distintas para cada $5ms$ de trama, es decir, la señal mapeada en el slot 0 es ligeramente distinta a la mapeada en el slot 10 para que de esta forma se pueda llevar a cabo la sincronización de trama, y permita al receptor poder distinguir entre ambas secuencias.

También se puede resaltar que la señal Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**) se mapea en el penúltimo símbolo de los slot 0 y 10, es decir, en el símbolo inmediatamente anterior en el que se mapea la Señal de Sincronización Primaria (**P-SCH**), esta colocación no es aleatoria sino que viene predefinida para que en el receptor se pueda realizar una detección coherente como veremos más adelante en el capítulo 5.

En resumen, con la Señal de Sincronización Secundaria (**S-SCH**), el receptor podrá estimar el valor de la identidad entre los 168 posibles valores, es decir, podrá estimar el valor de N_{id}^1 , además, gracias a tener secuencias distintas cada $5ms$ permitirá al receptor poder realizar la sincronización a nivel de trama.

4.4.2. Señal de Referencia

Las señales de referencia, también llamadas símbolos piloto, se utilizan para diversos mecanismos en el enlace descendente como pueden ser, obtener medidas de calidad, estimar la respuesta impulsional del canal o implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial. Este último mecanismo es el que se va a explotar en el presente proyecto.

Las señales de referencia ocupan diversos RE (una portadora y un símbolo) y mantienen una separación de 6 subportadoras entre sí. Dentro de cada PRB debemos de tener como mínimo dos señales de referencia ubicadas en el primer símbolo OFDMA de cada slot de la trama, a estas señales se las conoce con el nombre de señal de referencia primaria (RSP), si las condiciones lo requieren, adicionalmente también se podrá añadir un segundo grupo de señales de referencia típicamente ubicadas en el quinto símbolo OFDMA de cada slot de la trama radio conocidas con el nombre de señal de referencia secundaria (RSS) (véase Figura 4.5).

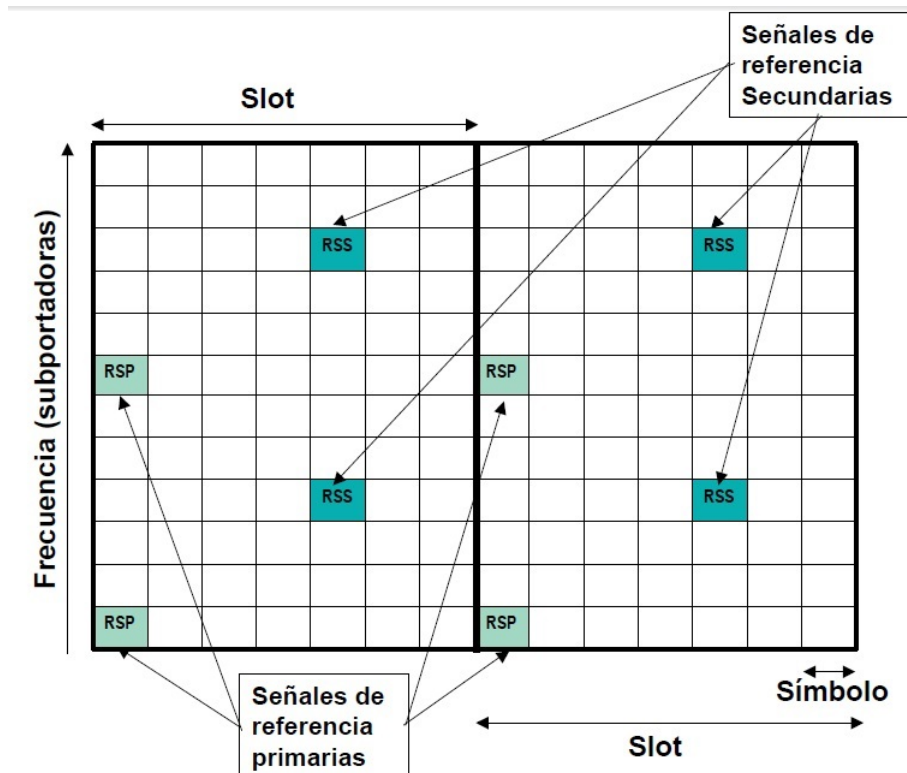


Figura 4.5: Ejemplo típico de señales de referencia para una subtrama con 12 subportadoras [13]

A la hora de definir los símbolos de las señales de referencia se han tenido en cuenta algunas consideraciones como:

- La separación temporal de los símbolos de referencia depende de la máxima frecuencia Doppler (f_d), en el caso de los sistemas LTE, esta frecuencia máxima es aproximadamente 500Km/h (950Hz), con lo cual, el tiempo de coherencia será de $T_c = 1/f_d \approx 1ms$ y por tanto, teniendo en cuenta el criterio de Nyquist⁴ será necesario incluir como mínimo dos símbolos de referencia por slot. Según se puede observar en la figura 4.5, en los sistemas LTE se ubican hasta 4 símbolos por slot (2 RPS y 2 RSS) lo que aumenta la precisión de estimar el canal.
- El sistema ubica un símbolo de referencia cada 6 subportadoras, esta separación está originada por el comportamiento del canal móvil. En entornos urbanos, el valor de la dispersión temporal del canal es del orden de $1\mu s$ ⁵, por lo tanto, el ancho de banda de coherencia puede estimarse como $B_c \approx 1/10\sigma_s \approx 100KHz$. Con lo cual, para que sea posible estimar la función de transferencia del canal será necesario que la separación de los símbolos sea inferior a B_c , es decir, con una separación de 6 subportadoras entre los símbolos de referencia tendremos una separación de $15KHz \cdot 6 = 90KHz$, que es inferior a B_c . Si además de los símbolos de referencia primarios, consideremos también los secundarios, la separación entre ellos sería de tan solo 3 subportadoras y por lo tanto $15KHz \cdot 3 = 45KHz$, con lo cual, nuevamente al añadir los símbolos de referencia secundarios aumentamos la precisión de estimar el canal.

El estándar LTE[1] especifica 6 tipos diferentes de señales de referencia dependiendo del modo y número de puertos utilizados.

1. **Señal de referencia específica de celda (CRS):** Las señales de referencia específicas de celda se definen solamente para una separación entre portadoras de $\Delta f = 15kHz$. Estas señales se pueden transmitir en uno o varios puertos de antena.
2. **Señal de Referencia MBSFN:** Las señales de referencia MBSFN se transmiten en el puerto de antena 4 ($p = 4$), además solo están definidas para cuando utilizamos el prefijo

⁴El criterio de Nyquist establece que para poder reconstruir la respuesta impulsional será necesario ubicar al menos 2 símbolos por T_c

⁵medida en términos del Delay Spread o σ_s

cíclico extendido. Este tipo de señales de referencia solo se transmitirán cuando se transmita el Physical Multicast Channel (Canal Multicast físico) ([PMCH](#)).

3. **Señales de referencia específicas UE:** Las señales de referencia específicas de UE son compatibles para la transmisión en los puertos 0,5,7 o 8. Las señales de referencia específicas de UE también son compatibles con la multiplexación espacial en los puertos 7 y 8.
4. **Señales de referencia de posicionamiento:** Las señales de referencia de posicionamiento sólo se transmitirán en las subtramas del enlace descendente configuradas para la transmisión de la señal de referencia de posicionamiento. Las señales de referencia de posicionamiento se transmiten en el puerto de antena 6 ($p = 6$).
5. **Señal de Referencia de Demodulación (DM-RS):** La señal de referencia de demodulación esta asociada al canal EPDCCH (enhanced Physical Downlink Control Channel) y se transmite en el mismo puerto de antena que el recurso físico asociado. Esta señal sirve como referencia válida para la demodulación EPDCCH.
6. **Señal de Referencia CSI (CSI-RS):** Las Señales de referencia CSI se transmiten en uno, dos, cuatro u ocho puertos de la antena utilizando $p = 15$; $p = 15, 16$; $P015, \dots, 18$ y $p = 15, \dots, 22$ respectivamente. Las Señales de referencia CSI se definen por sólo para $\Delta f = 15kHz$.

Como en el sistema utilizado se esta trabajando con Prefijo Cíclico (Cyclic Prefix) ([CP](#)) corto, separación entre portadoras de $15kHz$ ($\Delta f = 15kHz$) y un solo puerto de antena ($p = 0$), la única señal de referencia que se debe simular, será la señal de referencia específica de celda([1](#)), ya que es la única necesaria dados los requisitos del sistema.

4.4.2.1. Señal de Referencia Específicas de Celda ([CRS](#))

Las señales de referencia específicas de celda se transmiten en todas las subtramas del enlace descendente dentro del canal de transmisión [PDSCH](#). Además, como se ha comentado en el apartado anterior, las señales de referencia específicas de celda se pueden transmitir en uno o varios puertos de antena de 0 a 3.

En este proyecto solo se va a simular la utilización de un puerto, por lo tanto, la señal de referencia específica de celda se transmitirá únicamente por el puerto 0 ($p = 0$).

4.4.2.1.1. Secuencia de Generación :

La secuencia de generación de la señal de referencia específica de celda ($r_{l,ns}(m)$), se define en el estándar LTE[1] como:

$$r_{l,ns}(m) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m)) + j \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m + 1)), m = 0, 1, \dots, 2N_{RB}^{maxDL} - 1 \quad (4.6)$$

donde ns es el número de slot dentro de una trama de radio y l es el número de símbolo OFDM dentro del slot.

Para calcular la secuencia pseudo-aleatoria $c(i)$, se parte de un número inicial llamado c_{init} que depende del valor N_{ID}^{cell} y del tipo de CP.

$$c_{init} = 2^{10}(7(n_s + 1) + l + 1)(2N_{ID}^{cell} + 1) + 2N_{ID}^{cell} + N_{CP}$$

donde:

$$N_{cp} = \begin{cases} 1 & \text{si usamos CP corto} \\ 0 & \text{si usamos CP extendido} \end{cases}$$

Una vez que se ha obtenido el número inicial, se convierte a binario de 31 bits, y se le asigna a la variable x_2 .

$$x_2 = dec2bin(c_{init}, 31)$$

A su vez, también se genera una secuencia de la misma longitud que x_2 , y la se llamará x_1 . La secuencia x_1 deberá ser inicializada de la siguiente manera: $x_1(0) = 0, x_1(1) = 0, x_1(2) = 0, x_1(3) = 0, x_1(4) = 1$.

Una vez que se tienen las secuencias x_1 y x_2 inicializadas, ya se pueden implementar ambas secuencias de la siguiente forma:

$$x_1(n + 31) = (x_1(n + 3) + x_1(n)) \bmod 2$$

$$x_2(n + 31) = (x_2(n + 3) + x_2(n + 2) + x_2(n + 1) + x_2(n)) \bmod 2$$

Estas secuencias se deberán generar dentro de un bucle hasta conseguir el tamaño requerido por el sistema. Como se puede observar en la ecuación 4.6, se necesita una secuencia $c(i)$ de tamaño

$2 \cdot 2 \cdot N_{RB}^{max,DL}$, con lo cual, según se observa en la ecuación 4.7, tanto la secuencias x_1 como x_2 deberán de tener un tamaño de: $N_c + 2 \cdot 2 \cdot N_{RB}^{max,DL}$

Una vez que tenemos creadas las secuencias x_1 y x_2 con la longitud precisa, la secuencia $c(i)$ se genera de la siguiente forma:

$$c(n) = (x_1(n + N_c) + x_2(n + N_c)) \bmod 2 \quad (4.7)$$

donde la variable N_c tiene un valor de $N_c = 1600$.

4.4.2.1.2. Mapeo de secuencia :

Una vez que la señal $r_{l,ns}(m)$ ha sido generada correctamente, esta se debe mapear dentro de la rejilla de recursos generada anteriormente en el apartado 4.2.

La señal $r_{l,ns}(m)$ se mapea de acuerdo a:

$$a_{k,l} = r_{l,ns}(m') \quad (4.8)$$

donde

$$k = 6m + (v + v_{shift}) \bmod 6$$

$$m = 0, 1, \dots, 2N_{symp}^{DL} - 1$$

$$m' = m + N_{symp}^{max,DL} - N_{RB}^{DL}$$

Como se ha comentado anteriormente, l es el número del símbolo OFDMA dentro del slot. Para el caso de las señales de referencia específicas de celda, este valor será de $l = 0$ y $l = N_{symp}^{max,DL} - 3$, es decir, la señal se mapeará en los símbolos OFDMA $l = 0$ y $l = 5$.

Las variables v y v_{shift} definen la posición en el dominio de la frecuencia para las diferentes señales de referencia.

La variable v se especifica como:

$$v = \begin{cases} 0 & \text{si } l=0 \\ 3 & \text{para cualquier otro valor de } l \end{cases} \quad (4.9)$$

Mientras que el desplazamiento de frecuencia específico de la celda v_{shift} viene dado por:

$$v_{shift} = N_{ID}^{cell} \bmod 6 \quad (4.10)$$

La figura 4.6, ilustra los RE's utilizados para la transmisión de la señal de referencia de acuerdo con la definición anterior. La notación R_0 se utiliza para denotar un RE usado para la transmisión de la señal de referencia en el puerto de la antena 0.

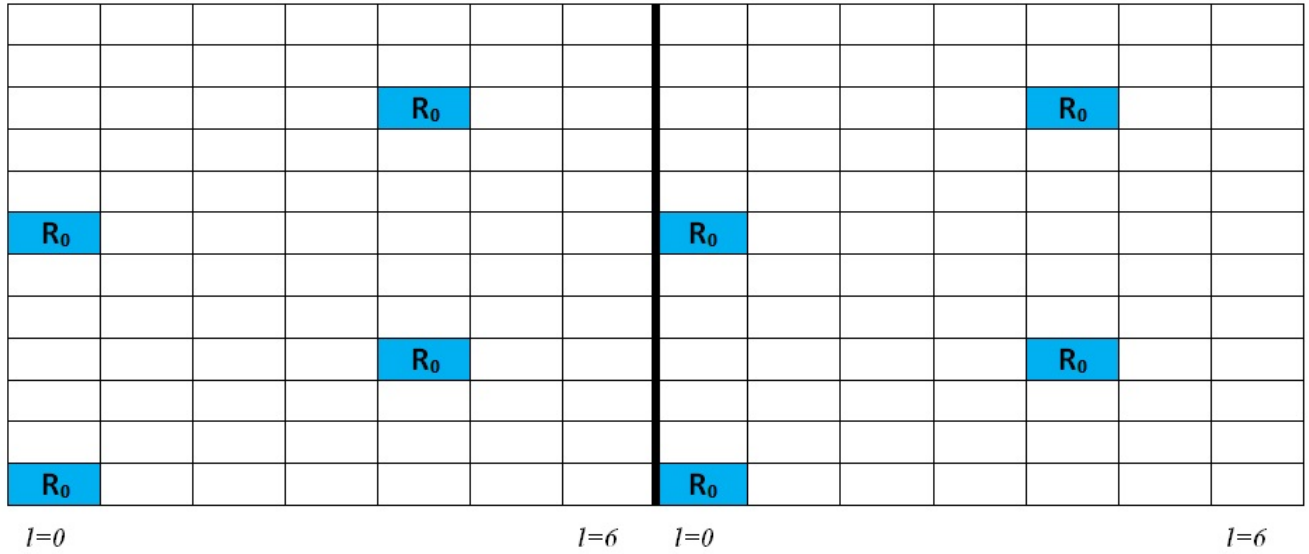


Figura 4.6: RE's utilizados para la transmisión de la señal de referencia específica de usuario

4.5. Generación de señal OFDMA

Una vez que se ha mapeado en la rejilla de recursos todas las señales necesarias para poder llevar a cabo el proceso de búsqueda de celda y sincronización en el receptor, se debe generar la trama OFDMA en el dominio del tiempo.

Para generar la trama OFDMA se deben seguir los siguientes pasos:

1. Realizar una IFFT de cada símbolo OFDMA para pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.
2. Añadir el Prefijo Cíclico (Cyclic Prefix) (CP) a cada símbolo OFDMA

4.5.1. Paso de la frecuencia al tiempo

El primer paso que se va a realizar para generar la trama OFDMA es pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo realizando una **IFFT!** de cada símbolo del slot. Para realizar este paso, se debe tener en cuenta que dependiendo del ancho de banda seleccionado, se realizará una IFFT de tamaño diferente, estos valores vienen indicados en la tabla 3.1. Para simular este aspecto en el código, se ha optado por utilizar la función *ifft* que viene predefinida en Matlab.

Una vez que se ha realizado la IFFT del tamaño adecuado a cada símbolo OFDMA, ya estamos en disposición de poder añadir su correspondiente CP a cada símbolo.

4.5.2. Añadir CP

En cualquier sistema de comunicaciones, al realizar la transmisión de una señal, esta se ve afectada por diferentes fenómenos entre los que destaca por su agresividad la propagación multicamino, esta propagación multicamino se genera debido a la presencia de múltiples reflexiones de la señal y como resultado, la señal será recibida en diferentes instantes de tiempo y con diferentes amplitudes y fases en el receptor.

Con la finalidad de combatir este efecto, la solución ofrecida por los sistemas OFDM es el denominado prefijo cíclico (CP). Esta solución consiste en alargar la transmisión de cada símbolo, es decir, coger las últimas N_{cp} muestras y colocarlas al principio del símbolo, consiguiendo de esta forma tener un nuevo símbolo de longitud $N = Nt + N_{cp}$ como se observa en la imagen 4.7.

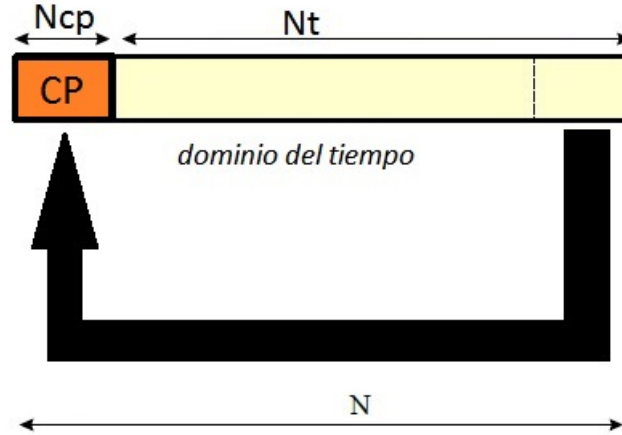


Figura 4.7: Inserción del prefijo cíclico

Si se elige una duración del prefijo cíclico mayor que el máximo retardo de las componentes multicamino, se conseguiría eliminar totalmente la interferencia Intersimbólica. Sin embargo, cuanto mayor sea la duración del prefijo cíclico, menor será la eficiencia en términos de potencia transmitida y de velocidad de transmisión. Como se comentó anteriormente, durante la realización de este proyecto se utilizará un CP corto.

Para este tipo de CP, la longitud varía en función del número del símbolo OFDMA de cada slot. Si nos encontramos ante el primer símbolo del slot, la longitud de dicho CP es de $5,21\mu seg$, mientras que si nos encontramos ante el resto de símbolos del slot, la longitud del CP será de $4,69\mu seg$. Estos valores han sido elegidos para eliminar la máxima interferencia Intersimbólica posible sin que esto penalice mucho la eficiencia.

4.6. Modulación Señal OFDMA

Una vez que se realiza la IFFT y se añade su correspondiente CP a cada símbolo, la señal OFDMA en el dominio del tiempo estaría completamente generada. El siguiente paso sería realizar una modulación de la señal para permitir un mejor aprovechamiento del canal de comunicación, posibilitar la opción de transmitir más información de forma simultánea y mejorar la resistencia contra posibles ruidos e interferencias.

En los sistemas LTE[1] se han establecido 4 tipos diferentes de modulación:

- BPSK
- QPSK
- 16-QAM
- 64-QAM

Una de las principales características de los sistemas OFDMA es que no impone a priori ninguna condición sobre los símbolos que se modulan sobre las diferentes subportadoras, es decir, los usuarios del sistema van adaptándose a lo largo del tiempo y variando la modulación elegida para la transmisión de la información, esta característica se la conoce como adaptación de enlace. En el presente proyecto se ha decidido suprimir tanto la etapa de modulación en el transmisor como la correspondiente demodulación en el receptor para poder simplificar la implementación del código lo máximo posible.

Capítulo 5

Algoritmos de búsqueda de celda y sincronización

5.1. Introducción

Para poder establecer la comunicación entre el UE y el eNB, el UE deberá llevar a cabo diversos procesos. El primer proceso que lleva a cabo se conoce con el nombre de *búsqueda de celda y sincronización*, durante este proceso, el UE examina las señales recibidas de las estaciones base (eNB) más cercana para comprobar cual de ellas tiene una mayor calidad y así poder realizar la sincronización con ella, y lograr la identidad de celda (Cell-ID) de dicha estación base.

El proceso de búsqueda de celda se debe realizar de forma periódica cada vez que el UE quiera actualizar la información de la celda a la que está conectado o para encontrar otra nueva celda a la que conectarse y poder llevar a cabo un handover como se comentó en el Capítulo 3.

Para poder llevar a cabo el procedimiento de búsqueda de celda serán necesarios los canales de sincronización (SCH) y de broadcast (BCH) generados en el Capítulo 4.

Hay muchos algoritmos en la literatura que sirven para poder implementar la sincronización y la búsqueda de la celda. En este proyecto se ha optado por utilizar el algoritmo propuesto por la University of Jordan[6], este algoritmo tiene en cuenta el efecto de aproximadamente todos los parámetros de sincronización y una combinación entre la exactitud y la simplicidad de hardware, además, cumple con las características de servir para las sistemas FDD y detección coherente como es el caso del sistema que se quiere implementar.

Otros algoritmos estudiados han sido descartados por tener una gran complejidad a la hora de su implementación software como por ejemplo [9], [7], otros sin embargo, por ser óptimos para el modo TDD como [8] y otros por su poca claridad a la hora de especificar los mecanismos como [11] y [10].

5.2. Procedimiento de búsqueda de celda

El objetivo principal de la búsqueda de celda es poder obtener una sincronización en frecuencia, es decir, establecer ortogonalidad entre subportadoras tan rápido y preciso como sea posible y una vez conseguido esto, mantener esta ortogonalidad en tanto como sea posible durante la recepción.

El procedimiento propuesto para este proyecto [6], lleva a cabo la sincronización y el procedimiento de búsqueda de celda completo. Se ha dividido este procedimiento en dos etapas claramente diferenciadas:

1. *Etapas 1 (Pre-FFT)*

- Dado que la información de fase no se ha obtenido todavía, la detección de la correlación cruzada no coherente se realiza en el dominio del tiempo basandose en 3 hipótesis de la señal P-SCH para detectar la temporización de símbolo OFDMA y el valor de N_{id}^2 .
- El Fractional Frequency Offset (Desfase de Frecuencia Fraccional) (FFO) es simultáneamente detectado y usado para corregir la parte fraccional del desplazamiento de frecuencia.

Después de la etapa 1, el UE habría identificado el N_{id}^2 . Sin embargo, N_{id}^1 sigue siendo desconocido para el terminal. Los algoritmos propuestos utilizan el P-SCH en el dominio del tiempo para realizar una correlación cruzada no coherente que también se emplea en el dominio de la frecuencia para obtener ganancias de canal para el S-SCH.

2. Etapa 2 (*Post-FFT*)

- Se realiza una detección por correlación cruzada coherente en el dominio de la frecuencia sobre las 168 hipótesis de las secuencias S-SCH usando un banco de correladores para detectar el valor de N_{id}^1 .
- El Integer Frequency Offset (Desfase de Frecuencia Entero) (IFO) estimado en el dominio de la frecuencia es usado para corregir la parte entera del desplazamiento de frecuencia.
- La detección de la sincronización de la trama de radio se lleva a cabo gracias a la existencia de dos señales S-SCH diferentes por cada trama, tal y como se muestra en la figura 4.3.

Después de la etapa 2, el UE habrá detectado el identificador de celda N_{ID}^{cell} , basado en el N_{id}^2 del P-SCH y N_{id}^1 del S-SCH. Gracias a la identidad de celda N_{ID}^{cell} , el UE puede obtener la secuencia pseudo-aleatoria utilizada para la generación de las señales de referencia de celda.

Una vez que el procedimiento de búsqueda de celda está completo, el UE recibe la información del sistema broadcast (PBCH) para obtener el resto de parámetros del sistema tales como, el ancho de banda de transmisión utilizada en la celda, el número de antenas de transmisión y el tipo de CP basado en BCH y señales de referencia.

La siguiente figura ilustra el diagrama de bloques del algoritmo de búsqueda de celda y sincronización propuesto para el presente proyecto[6].

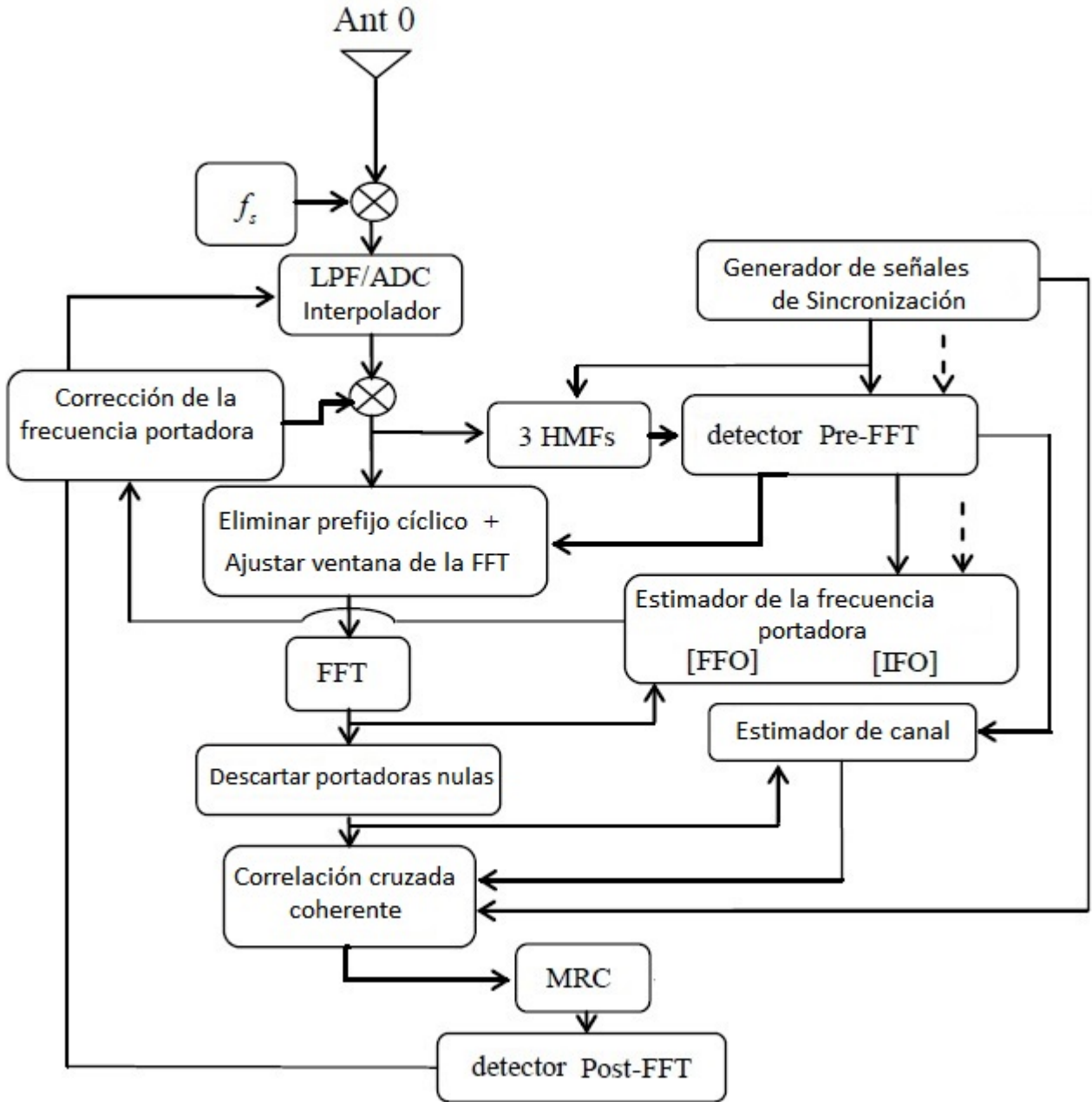


Figura 5.1: Diagrama de bloques del algoritmo para la búsqueda de celda y sincronización[6]

El diagrama de bloques se compone de las siguientes unidades: Interpolador, señales de sincronización del generador, un conjunto de filtros adaptados jerárquicos (HMFs) para hacer la correlación cruzada no coherente en el dominio del tiempo con las 3 señales **P-SCH**, un detector de Pre-FFT para detectar la temporización de símbolos y el valor de N_{id}^1 , un estimador de

la frecuencia portadora que consta de dos unidades: **FFO** y **IFO**, una unidad de corrección de frecuencia portadora, un bloque que elimina el **CP**, un bloque demodulador FFT, un estimador de canal simple para **S-SCH** en referencia al **P-SCH**, un banco de correladores para la correlación cruzada coherente con las 168 señales del **S-SCH**, y un detector post-FFT para detectar valor de N_{id}^2 y la temporización de la trama.

5.2.1. Etapa 1 (Pre-FFT)

El algoritmo de búsqueda de celda propuesto se centrará en una única frecuencia portadora, aunque en la realidad, se debería de realizar la búsqueda de frecuencia portadora entre las más de 600 frecuencias existentes.

5.2.1.1. Sincronización de tiempo gruesa y detección del N_{id}^2

El primer paso que se lleva a cabo es realizar una correlación cruzada no coherente entre las muestras recibidas y cada una de las tres réplicas de la señal **P-SCH**, $c_{P-SCH,i}(u)$ donde $i \in 0, 1, 2$, se corresponden con los diferentes valores que puede tomar N_{id}^2 .

$$D_1^i(n) = |1/L_{SCH} \sum_{u=0}^{N-1} r(u+n)c_{P-SCH,i}^*(u)|^2 \quad (5.1)$$

donde L_{SCH} es la longitud de la señal **P-SCH** y se divide entre ella para normalizar.

Los valores de correlación calculados pueden ser promediados sobre una trama de radio con el fin de reducir el efecto del ruido y la interferencia todo lo posible.

De entre los tres valores calculados para D_1 , se observa cuál de ellos es el de mayor magnitud ya que este se corresponderá con el valor de N_{id}^2 :

$$\hat{n} = \max_n \{D_1^i(n)\} \quad (5.2)$$

- Si el máximo se encuentra en la posición 0, el valor de $N_{id}^2 = 0$
- Si el máximo se encuentra en la posición 1, el valor de $N_{id}^2 = 1$
- Si el máximo se encuentra en la posición 2, el valor de $N_{id}^2 = 2$

Como se conoce que la señal **P-SCH** se coloca en el último símbolo OFDMA de los slots 0 y 10 de la trama radio, una vez que se conoce el máximo, solo tendremos que mirar en qué posición de la trama se ha encontrado ese máximo para poder establecer la temporización de símbolo

(véase figura 6.12).

En resumen, gracias a la ecuación 5.1, se detecta el valor de N_{id}^2 y se realiza una temporización a nivel de símbolo.

5.2.1.2. Cálculo del desplazamiento de frecuencia fraccional (FFO)

Una estimación normalizada del Fractional Frequency Offset (Desfase de Frecuencia Fraccional) (FFO) se puede obtener en base a la fase de los resultados de la función de correlación cruzada no coherentes de la temporización gruesa (etapa anterior).

La máxima probabilidad de estimación de la frecuencia fraccional se calcula como:

$$\hat{\Gamma}_{ML} = 1/\pi \cdot \arg\left\{ \sum_{u=0}^{N-1} r(u + \hat{n}) c_{P-SCH,i}^*(u) \right\} \quad (5.3)$$

donde $c_{P-SCH,i}^*(u)$ es la réplica de la correspondiente señal P-SCH detectada en el paso anterior.

Una vez calculado el FFO, se puede corregir el desplazamiento de frecuencia fraccional multiplicando cada símbolo OFDMA (excluyendo el CP) por $e^{-j2\pi\gamma_{ML}n/N}$ donde $0 \leq n \leq N - 1$.

5.2.2. Etapa 2 (Post-FFT)

Una vez que se han obtenido las estimaciones de temporización gruesa y la señal recibida se ha corregido mediante los valores estimados del FFO. La recepción OFDMA requiere la eliminación del CP de cada símbolo y convertir al dominio de la frecuencia la señal corregida.

5.2.2.1. Estimación del desplazamiento de frecuencia de la parte entera IFO

El desplazamiento de frecuencia de la parte entera es un múltiplo entero de la separación entre subportadoras ($\Delta f = 15kHz$), este valor se puede estimar mediante el cálculo de la correlación cruzada de $\{c_{P-SCH,i}^*(k)\}$ con su correspondiente secuencia recibida, donde i es el índice del P-SCH recibido y $k = 0, \dots, L_{SCH} - 1$.

Para calcular el **IFO** se utiliza la siguiente ecuación:

$$Y(m) = FFT_N\{r(n)e^{-j2\pi\gamma_{ML}n/N}\} \quad (5.4)$$

donde $0 \leq m \leq L_{SCH} + 10$

El análisis de la correlación cruzada se realiza utilizando la ecuación:

$$\beta_j = \frac{1}{L_{SCH}} \sum_{k=0}^{L_{SCH}-1} Y(5+j+k) \cdot c_{P-SCH,i}^*(k) \quad (5.5)$$

donde $j = -5, \dots, 5$.

El máximo valor absoluto de la ecuación 5.5 produce el **IFO** de la siguiente manera:

$$\hat{\Gamma} = argmax\{|\beta_j|\} \quad (5.6)$$

$\hat{\Gamma}$ debe ser un número entero, ya que su propio nombre lo indica IFO (desplazamiento de frecuencia de la parte entera).

Una vez se ha calculado el valor del **IFO**, se puede corregir el desplazamiento de frecuencia entera de cada símbolo OFDMA recibido excluyendo el CP y multiplicándolo por $e^{-j2\pi\hat{\gamma}n/N}$ donde $0 \leq n \leq N - 1$.

5.2.2.2. Estimación de N_{id}^1 y Detección del tiempo de trama

Una vez que se ha corregido tanto el **FFO** como el **IFO**, la complejidad del UE se incrementará considerablemente ya que el proceso de identificación de N_{id}^1 debe ser realizado para cada tipo de longitud del **CP** (tanto corto como largo), ya que el receptor todavía desconoce el tipo de **CP** utilizado por el **eNB**.

Por tanto, la longitud del **CP** del **S-SCH** en el penúltimo símbolo OFDMA se estima utilizando la detección ciega, es decir, primero se supone un **CP** corto y después un **CP** largo y solo con uno de ellos el resultado de la detección de N_{id}^1 será correcto.

Antes de poder comenzar con la detección de N_{id}^1 , se debe convertir toda la señal recibida al dominio de la frecuencia, suprimiendo previamente el **CP** de cada símbolo OFDMA. Una vez

que se ha quitado el CP a cada símbolo, se procede a realizar una FFT de tamaño correspondiente según ancho de banda elegido por el sistema (véase tabla 3.1).

Una vez que se tiene la señal recibida corregida en frecuencia, eliminados los CP de cada símbolo OFDMA y en el dominio de la frecuencia, se procede a realizar una detección ciega de N_{id}^1 llevando a cabo el siguiente algoritmo de detección coherente.

El receptor UE correla las muestras de la señal recibidas con una réplica de cada una de las muestras de la señal S-SCH, $\{c_{S-SCH,i}(k)\}_{k=0}^{L_{SCH}-1}$, donde $i \in \{0, \dots, 167\}$ se corresponde con los posibles valores de N_{id}^1 . La suma resultante se debe normalizar dividiendo el resultado entre L_{SCH} .

$$D_2^i(m') = Re\left\{\frac{1}{L_{SCH}} \sum_{m'=0}^{L_{SCH}} Y_{S-SCH}(m') \cdot c_{S-SCH,i}^*(m')\right\} \quad (5.7)$$

La suma coherente es utilizada para poder reducir la influencia del ruido de fondo y la interferencia.

A partir de los valores de D_2^i , el valor de N_{id}^1 de la celda objetivo se identifica como:

$$\hat{i} = \max_i \{D_2(i)\} \quad (5.8)$$

donde el índice \hat{i} del máximo valor de D_2^i será la estimación del valor de N_{id}^1 .

Cabe destacar que debido a la existencia de dos secuencias S-SCH diferentes en la trama radio, como se muestra en la figura 4.3, el terminal puede resolver la ambigüedad de 5ms de tiempo resultante de la primera etapa, pudiendo conseguir la temporización a nivel de trama.

Una vez que se ha estimado tanto el valor de N_{id}^1 como N_{id}^2 , ya somos capaces de determinar cuál es el valor de N_{id}^{Cell} :

$$N_{id}^{Cell} = 3 \cdot N_{id}^1 + N_{id}^2 \quad (5.9)$$

Una vez determinado el valor de N_{id}^{Cell} y establecida la temporización de trama, el receptor ya está en disposición de poder estimar la secuencia pseudo-aleatoria que se utiliza para la generación de las señales de referencia de celda y así poder recibir la información del PBCH para obtener el resto de parámetros del sistema tales como, el ancho de banda de transmisión utilizada en la celda, el número de antenas de transmisión etc...

Una vez llegados a este punto, se puede considerar que el UE se encuentra sincronizado con la celda correspondiente, y por tanto, finalizados los algoritmos de búsqueda de celda y sincronización, ya que el UE ha obtenido todos los parámetros necesarios para poder iniciar una comunicación con el eNB.

Capítulo 6

Simulación en Matlab

En este capítulo se van a describir y detallar las diferentes pruebas y mediciones llevadas a cabo sobre el sistema. En una primera parte se van a explicar las diferentes medidas realizadas sobre las señales de sincronismo implementadas por el sistema.

A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos durante la simulación de una trama [OFDMA](#) con unos parámetros específicos dependiendo del ancho de banda elegido, estos resultados se obtendrán tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

Y ya por último, se llevarán a cabo una serie de medidas en el receptor, para de esta forma poder demostrar el correcto funcionamiento del algoritmo de búsqueda de celda y sincronización propuesto en este proyecto (véase [Capítulo 5](#)).

6.1. Señal de Sincronismo (SCH)

Esta sección se va a centrar en las señales de sincronismo implementadas en el sistema. Como se ha comentado en el Capítulo 4, la señal de sincronismo se divide en dos señales, la **P-SCH** o señal de sincronización primaria y la **S-SCH** o señal de sincronización secundaria.

Para poder comprobar la correcta implementación de ambas señales de sincronización se van a llevar a cabo una serie de medidas sobre ellas:

- La primera medida que se va a realizar es calcular el valor de la autocorrelación de cada una de las señales. La función de autocorrelación se usa para poder encontrar patrones repetitivos dentro de una señal, esto está asociado con el hecho de que una secuencia periódica al ser comparada con cualquier versión de ella desplazada, tendrá una diferencia entre acuerdos y desacuerdos igual a 1. Para realizar la autocorrelación se va a usar la función de Matlab $rxx = xcorr(x)$, donde x será la señal de sincronización primaria o secundaria, por definición, si x tiene una longitud de $M = 62$ elementos, el vector rxx que nos devuelve tendrá una longitud total de $2M - 1$ elementos.
- La segunda medida que se va a realizar es calcular el valor del PAPR o Peak to Average Power Ratio (Relación de pico a potencia media), para calcular dicho valor se debe aplicar la siguiente formula:

$$PAPR = \frac{\max(SCH)}{\text{mean}(SCH)} = \frac{\max(|SCH|^2)}{E\{|SCH|^2\}} \quad (6.1)$$

donde SCH será o la señal de sincronización primaria o la de sincronización secundaria. Según se indica en [6], tanto la señal de sincronización primaria, como la señal de sincronización secundaria deberán de tener un valor de **PAPR**= 1 o si lo expresamos en dB , **PAPR**= $0dB$.

6.1.1. Señal de Sincronización Primaria (P-SCH)

Como se había comentado en la sección 4.4.1.1, la señal de sincronización primaria se genera mediante una secuencia de Zadoff-Chu (véase C.1). Las secuencias de Zadoff-Chu son un caso especial de las secuencias tipo CAZAC (Secuencias de auto-correlación de amplitud cero constantes), la característica más destacable de este tipo de secuencias es que tiene un valor de amplitud unidad, es decir, la autocorrelación tendrá un máximo de 1 en $x = 0$.

Como se ha comentado anteriormente, utilizando la función de Matlab *xcorr* se obtiene la siguiente función de autocorrelación para cada uno de los valores de N_{id}^2 :

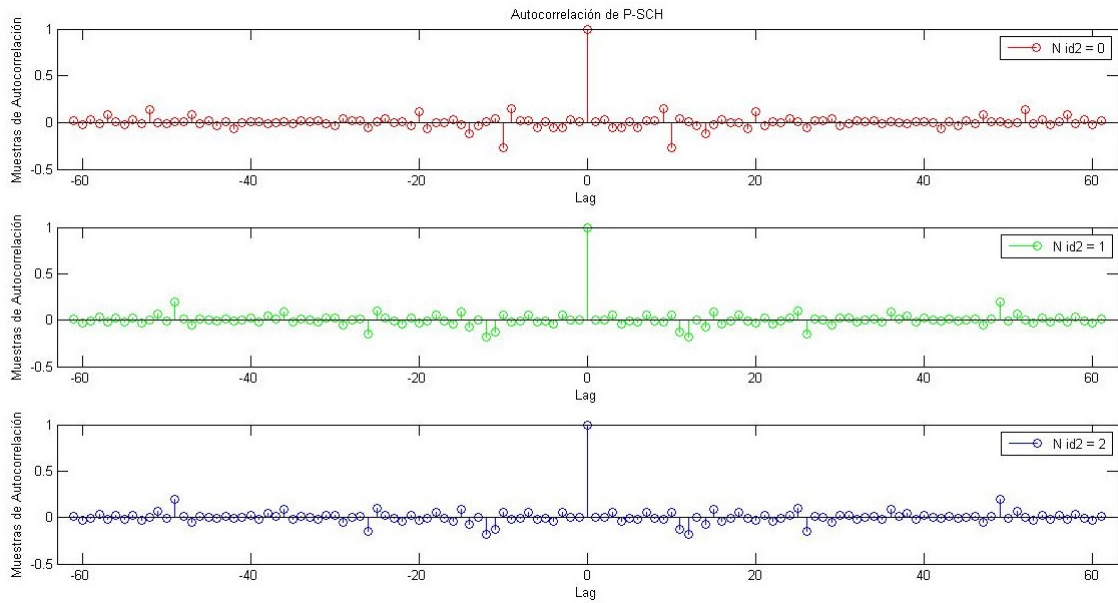


Figura 6.1: Autocorrelación de las señales P-SCH

Como se había anticipado, se puede observar en la figura 6.1 que la función de autocorrelación tiene un máximo de 1 en $x = 0$, otra característica que cabe destacar en la figura es que esta propiedad se mantiene aunque varíen los posibles valores de $N_{id}^2 \in 0, 1, 2$.

La siguiente medida que se ha realizado es calcular el valor en dB del PAPR según la ecuación 6.10, el valor obtenido se puede observar en la figura 6.2:

```
K>> PAPR_PSCH = 10*log( max(abs(PSCH).^2)/mean(abs(PSCH).^2) )  
  
PAPR_PSCH =  
  
0
```

Figura 6.2: Valor del PAPR en la P-SCH

Como era de esperar y según se ha indicado anteriormente, el valor de PAPR de la señal de sincronización primaria es de 0dB

Por último, en la siguiente figura se muestra tanto la parte real como la parte imaginaria de la señal P-SCH generada por el transmisor:

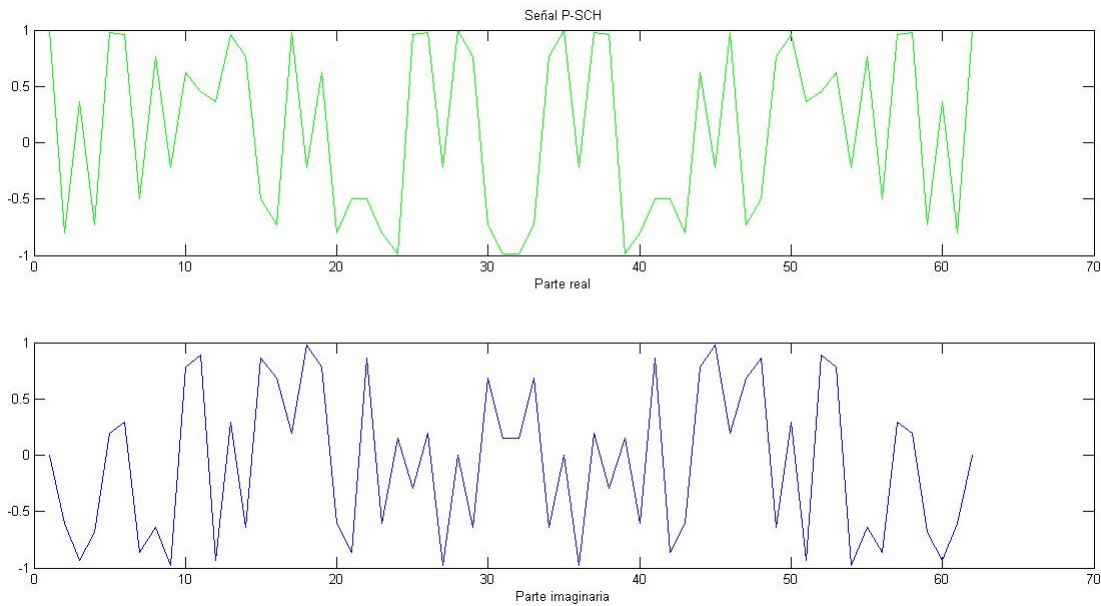


Figura 6.3: Señal P-SCH generada por el transmisor

6.1.2. Señal de Sincronización Secundaria (S-SCH)

Según se ha explicado en la sección 4.4.1.2, la Señal de Sincronización Secundaria (S-SCH) se genera como una concatenación de dos secuencias de máxima longitud o m – sequences¹ intercaladas y asociadas a una secuencia P-SCH.

Al igual que ocurría en la P-SCH y como se indica en el Apéndice C.3, la S-SCH es una secuencia con un valor de amplitud unidad, se debe resaltar que como se ha destacado en el capítulo 4.4.1.2, se generan dos secuencias S-SCH diferentes, una de ellas se mapea en la subtrama 0 (slot 0) y la otra en la subtrama 5 (slot 10) de la trama radio.

Siguiendo el mismo procedimiento y utilizando de nuevo la función de Matlab *xcorr*, se han obtenido las siguiente funciones de autocorrelación para cada una de las secuencias S-SCH:

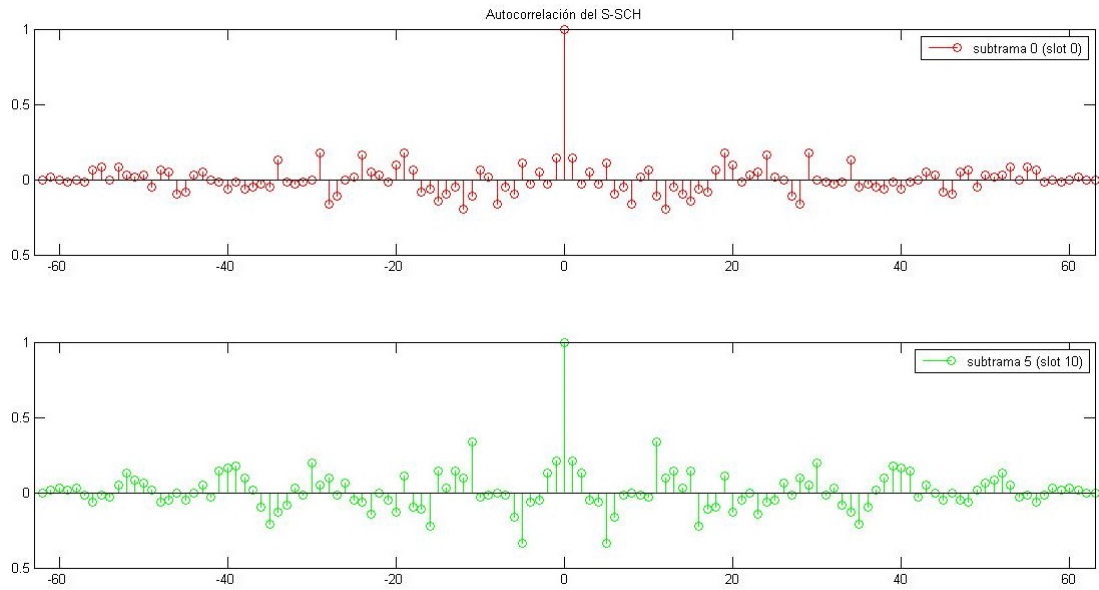


Figura 6.4: Autocorrelación de las señales S-SCH

Semejantemente a lo ocurrido en la señal P-SCH, en la figura 6.4 se puede observar que ambas secuencias S-SCH tienen un valor de amplitud igual a 1, algo que era de esperar. De manera análoga, aunque se varié entre los posibles valores de $N_{id}^1 \in 0, 1, \dots, 167$, la función de autocorrelación de S-SCH seguirá teniendo un máximo de amplitud igual a 1.

¹véase Apéndice C.3

Nuevamente se ha calculado el valor del PAPR en dB según la ecuación 6.10 para la señal *S-SCH*, el valor obtenido se puede observar en la siguiente figura:

```
K>> PAPR_SSCH = 10*log( max(abs(SSCH).^2)/mean(abs(SSCH).^2) )

PAPR_SSCH =

0
```

Figura 6.5: Valor del PAPR en la *S-SCH*

Como era de esperar y de la misma forma que ocurrió con la señal *P-SCH*, el valor de PAPR de la señal de sincronización secundaria es de *0dB* también.

Por último, en la siguiente figura 6.6 se puede observar la secuencia generada para la señal *S-SCH*.

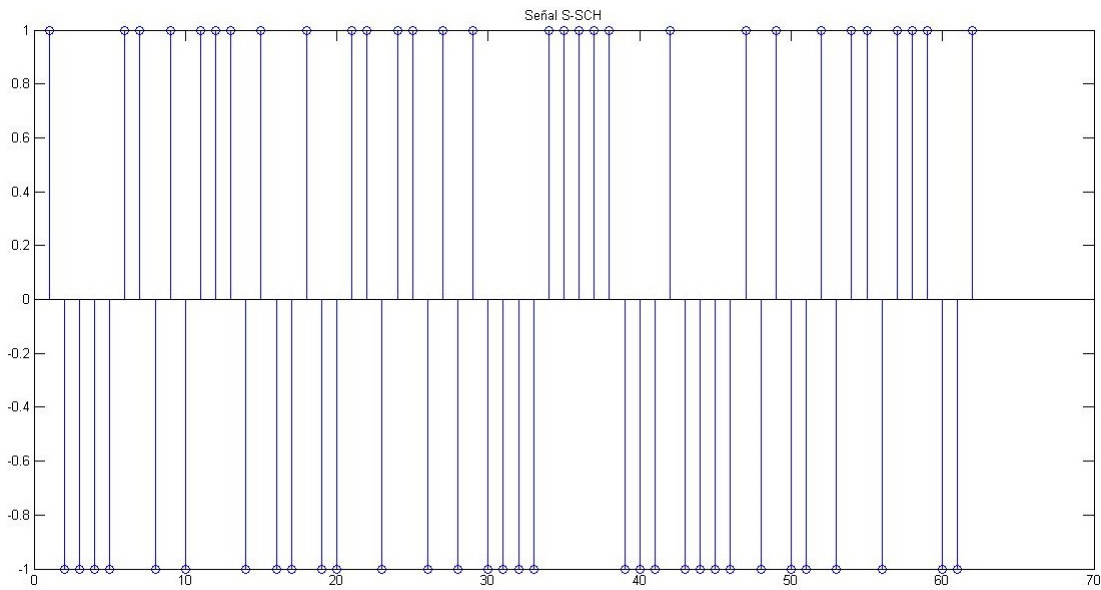


Figura 6.6: Señal *P-SCH* generada por el transmisor

Tal y como se describe en el Apéndice C.2, la señal *S-SCH* es una secuencia binaria de longitud 62, con aproximadamente el mismo número de valores 1 y -1 .

6.2. Señal OFDMA

En esta sección se van a mostrar los resultados obtenidos durante la simulación de una trama OFDMA.

Se va a realizar una simulación suponiendo un ancho de banda de $BW = 1,4MHz$, se ha elegido este ancho de banda porque es el que menor carga computacional conlleva, ya que a la hora de ejecutar el código con Matlab, cuando mayor sea el tamaño de la FFT y el número total de subportadoras ocupadas, mayor será el tiempo de ejecución.

A continuación se van a enumerar los diferentes parámetros utilizados según el ancho de banda seleccionado:

- Ancho de banda: $BW = 1,4MHz$
 - Numero de subportadoras por RB: $N_{sc}^{RB} = 12$
 - Frecuencia de muestreo: $fm = 1,92 * 10^6$
 - Tamaño de la FFT: $FFT_{size} = 128$
 - Número de RB por Slot: $N_{RB}^{DL} = 6$
 - Número total de subportadoras ocupadas: $N_s = 72$
- Separación entre portadoras: $\Delta f = 15kHz$
- Longitud de prefijo cíclico corto:
 - Tamaño del prefijo cíclico corto primer símbolo OFDM: $T_{cp1} = 5,2e^{-006}$
 - Tamaño del prefijo cíclico corto resto de símbolos OFDM: $T_{cp2} = 4,7e^{-006}$
- Numero de símbolos OFDM por Slot(CP corto): $N_{symb}^{DL} = 7$
- Numero de antenas: $puerto = 0$

Durante la siguiente simulación se va a suponer una trama radio OFDMA, la cual, solamente contendrá las señales de referencia y sincronismo. Según especifica el estándar 3GPP[1], y tal y como se indicó en el capítulo 4.4.2.1, las señales de referencia se transmiten en el primer y quinto símbolo OFDMA de cada uno de los slots que componen la trama radio. Por su parte, como se indicó en el capítulo 4.4.1, las señales de sincronismo se transmiten en el sexto y séptimo símbolo OFDMA de los slot 0 y 10 de la trama radio.

La figura 6.7 muestra la trama radio OFDMA generada por el transmisor en el dominio del tiempo:

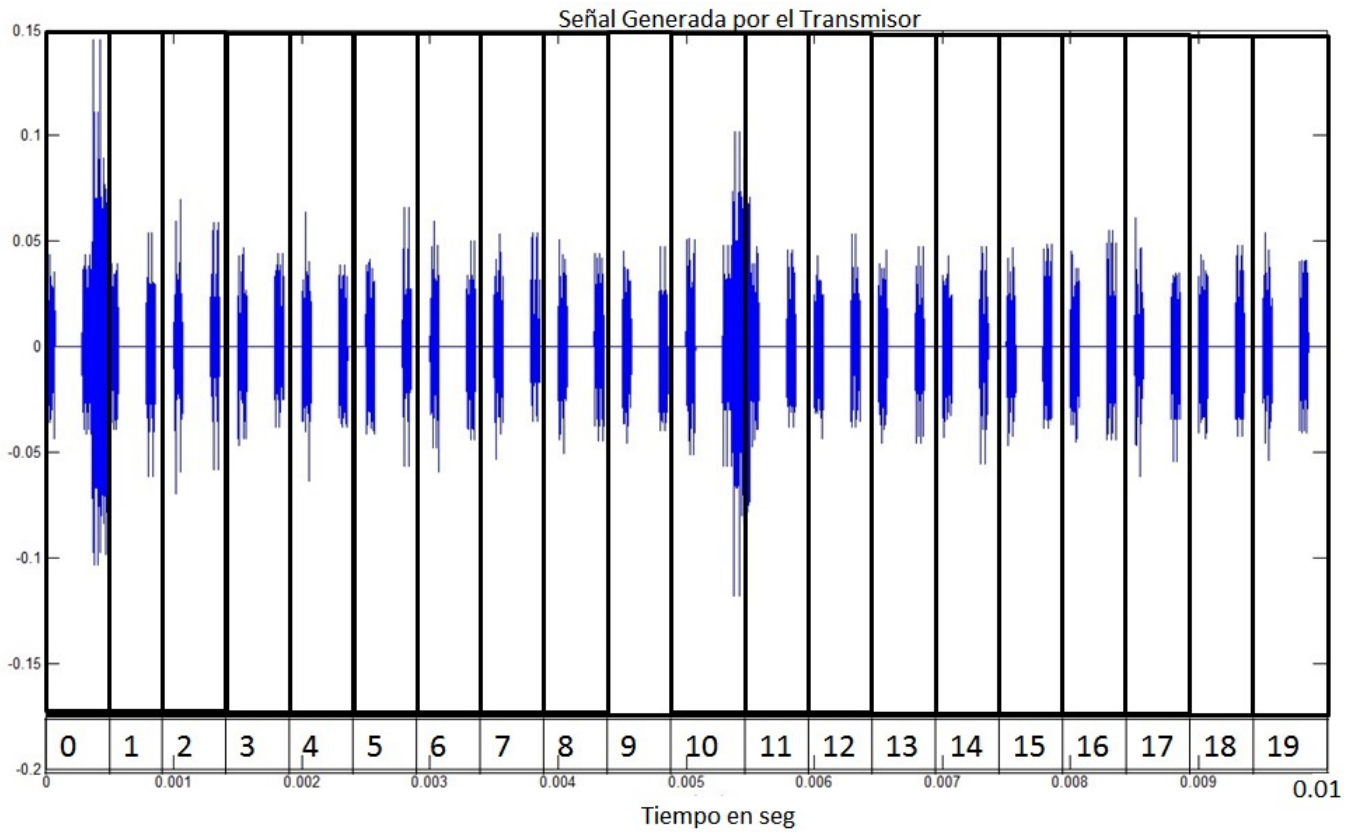


Figura 6.7: Trama Radio OFDMA en el dominio del tiempo

Como se puede observar en la figura 6.7, se diferencian claramente los 20 slots, numerados del 0 al 19, que componen una trama radio OFDMA. A su vez, dentro de cada slot se pueden distinguir tanto las señales de referencia como las señales de sincronización.

Si calculamos la densidad de potencia espectral de la anterior señal OFDMA generada por el transmisor y la centramos en una frecuencia portadora de 2GHz, se obtiene el siguiente espectro:

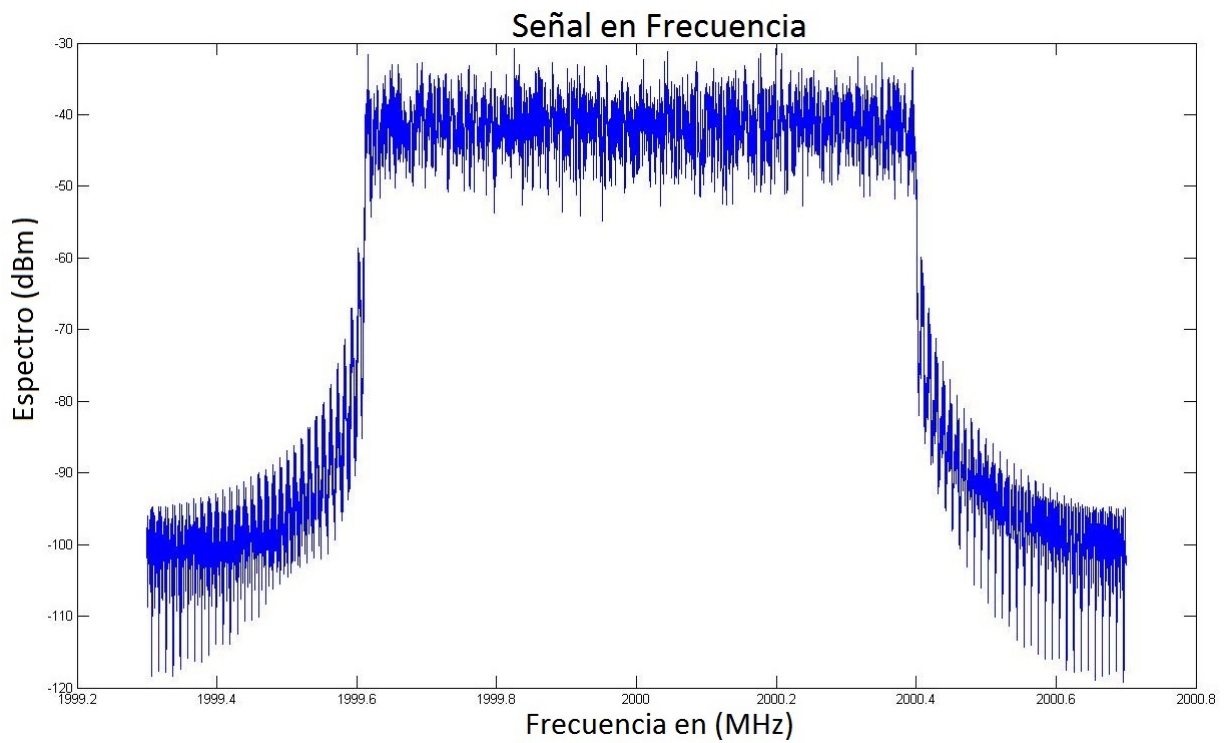


Figura 6.8: *Espectro de la trama OFDMA*

En la figura 6.9, se observa la forma que tiene un slot de la señal OFDMA en el dominio del tiempo. Se pueden distinguir de forma clara los 7 símbolos OFDM incluyendo el prefijo cíclico (CP) de cada uno de ellos.

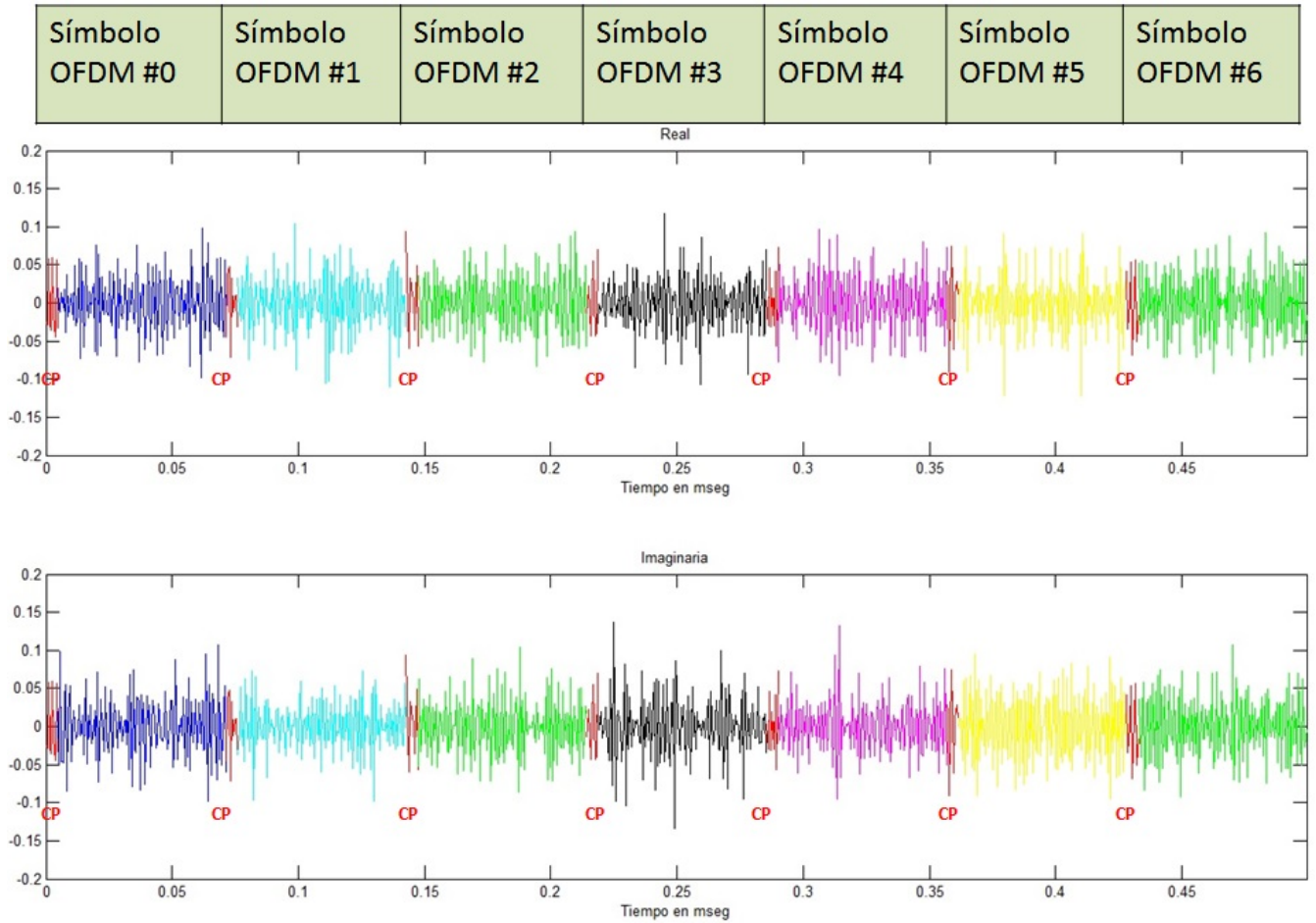


Figura 6.9: Slot de una Señal OFDMA en el dominio del tiempo

Para llevar a cabo esta simulación, se ha rellenado la trama radio con datos aleatorios para poder observar de forma más precisa cada uno de los símbolos OFDMA con sus correspondientes prefijos cíclicos.

Como se ha explicado en la sección 2.1.1, uno de los principales problemas que tiene la técnica de acceso al medio OFDMA es que tiene un valor alto de PAPR, en la siguiente figura se muestran los diferentes valores de PAPR que toman cada uno de los 140 símbolos OFDMA que componen una trama radio, se debe apreciar que, excluyendo a los símbolos donde van mapeadas las señales de sincronización (símbolos 6, 7, 76 y 77) que tienen un $\text{PAPR} = 0\text{dB}$ como se a comentado anteriormente, el resto de símbolos tienen un valor medio de $\text{PAPR} = 17\text{dB}$. Es por este motivo por el cual se decidió utilizar la técnica de acceso al medio SC-FDMA para el enlace descendente, ya que, según se pudo estudiar en otros proyectos como [14], el valor medio de PAPR para una trama radio es de solo $\text{PAPR} = 8\text{dB}$, valor claramente inferior al obtenido durante la simulación de este proyecto.

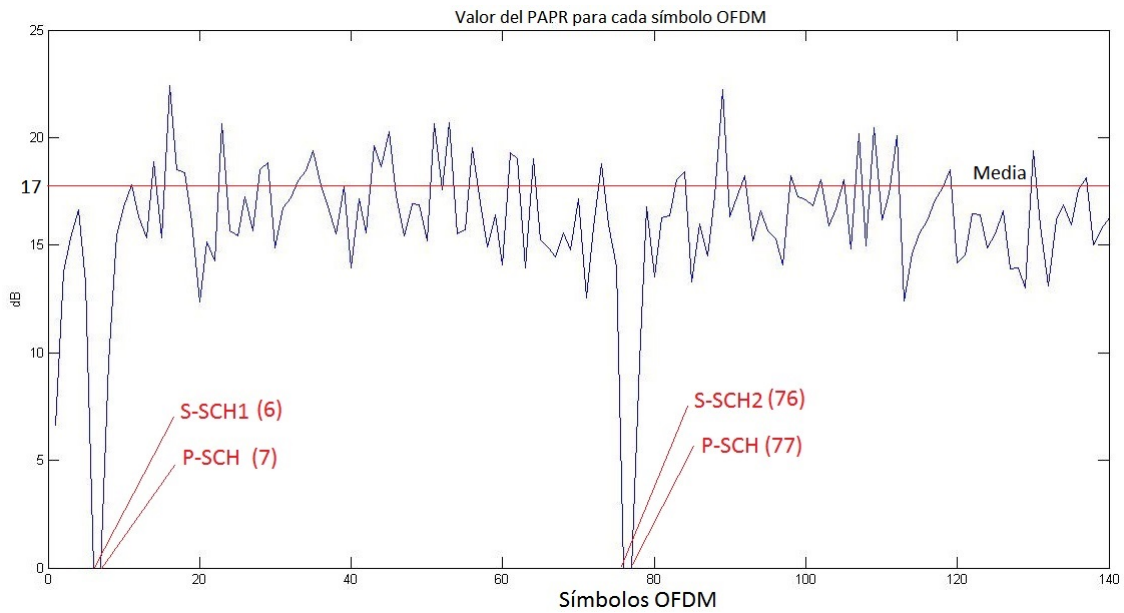


Figura 6.10: Valor del PAPR para cada símbolo OFDMA de una trama radio

6.3. Algoritmo de Búsqueda de Celda y Sincronización

En esta sección se va a comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo explicado en el capítulo 5 mediante su simulación con el programa [Matlab](#)

6.3.1. Etapa 1 (Pre-FFT)

En la primera etapa del algoritmo, los principales objetivos serán tanto conseguir detectar el valor de N_{id}^2 utilizado por el transmisor a la hora de generar la señal de sincronización y la señal de referencia, como obtener una primera sincronización temporal gruesa.

En la siguiente figura se puede observar como el algoritmo propuesto es capaz de detectar el valor correcto de N_{id}^2 de entre los tres posibles valores utilizando la ecuación 5.1 descrita en la sección 5.2.1. Al implementar dicha ecuación, se obtiene un máximo en la correlación cruzada para el valor de N_{id}^2 detectado, tal y como se muestra en la siguiente figura:

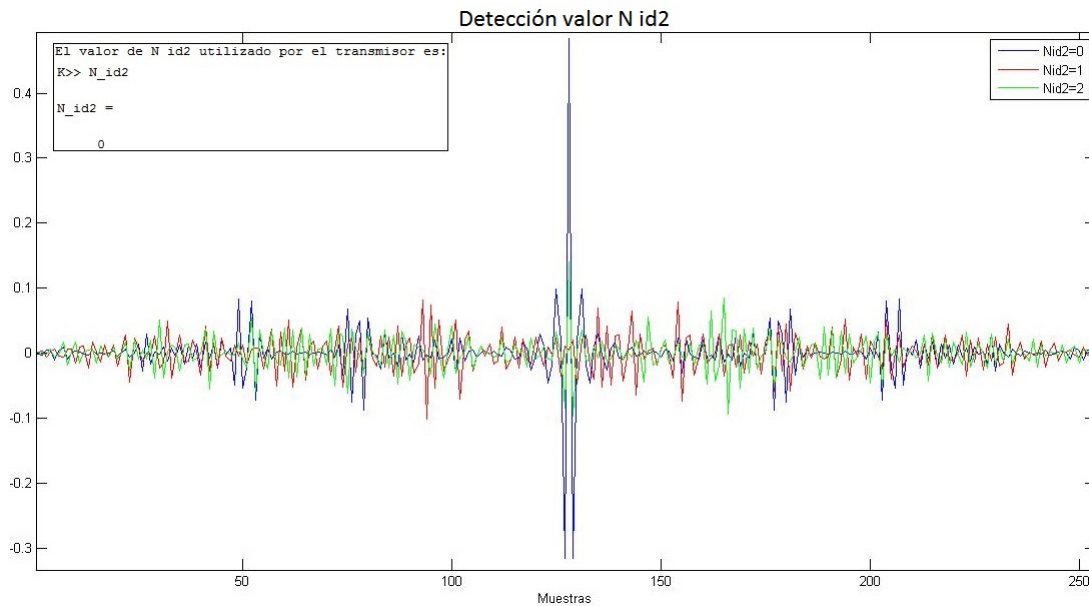


Figura 6.11: Detección del valor de N_{id}^2

Gracias a que el algoritmo es capaz de, tanto detectar el valor N_{id}^2 como también la posición donde este ha sido encontrado, se puede realizar una estimación temporal gruesa de una forma muy simple. Como el receptor conoce de antemano tanto la duración de una subtrama radio ($1ms$), como que la señal **P-SCH** va ubicada en el último símbolo OFDMA de los slots 0 y 10 de las subtramas 0 y 5, resulta muy sencillo para el receptor establecer la sincronización de cada símbolo OFDMA, tal y como lo muestra la figura 6.12.

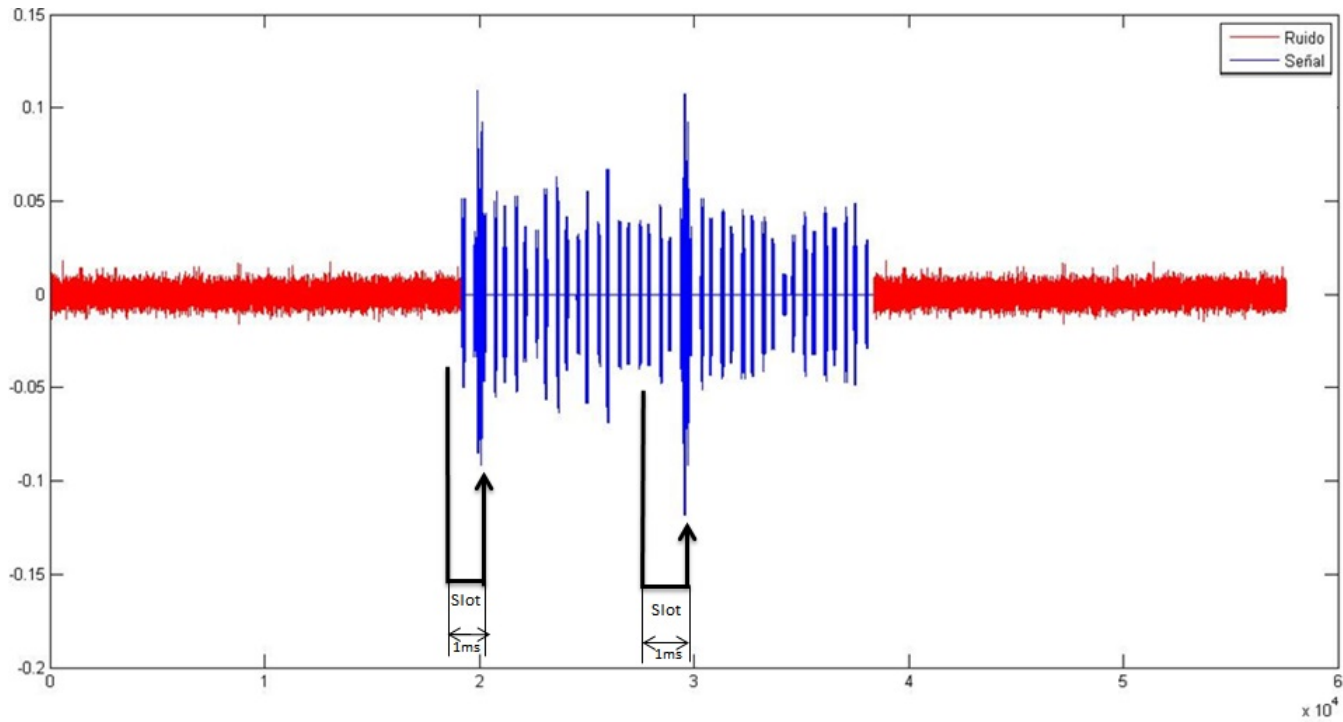


Figura 6.12: *Sincronización temporal gruesa*

Cabe destacar que la sincronización de trama no se puede establecer todavía debido a que la señal **P-SCH** se envía de forma repetida para cada uno de los slots de la trama radio, es decir, el receptor es capaz de reconocer los slots 0 y 10 pero no es capaz de distinguirlos entre sí, este problema se solucionará posteriormente gracias a la señal **S-SCH**.

6.3.2. Etapa 2 (Post-FFT)

Una vez que el receptor ha detectado el valor correcto de N_{id}^2 y que se ha conseguido establecer la sincronización de símbolo, este realiza una FFT a la señal recibida y corregida para conseguir cambiar del dominio del tiempo al de la frecuencia.

A partir de este punto, la complejidad del receptor aumenta considerablemente ya que debe detectar el valor correcto de N_{id}^1 de entre las 168 posibilidades que existen, además, tiene la dificultad de que como el receptor desconoce si el transmisor ha utilizado CP corto o largo, debe de realizar la simulación suponiendo ambas posibilidades.

Utilizando la ecuación descrita en la sección 5.2.2 y suponiendo ambos CP, el receptor es capaz de detectar el valor correcto de N_{id}^1 , tal y como muestra la figura 6.13:

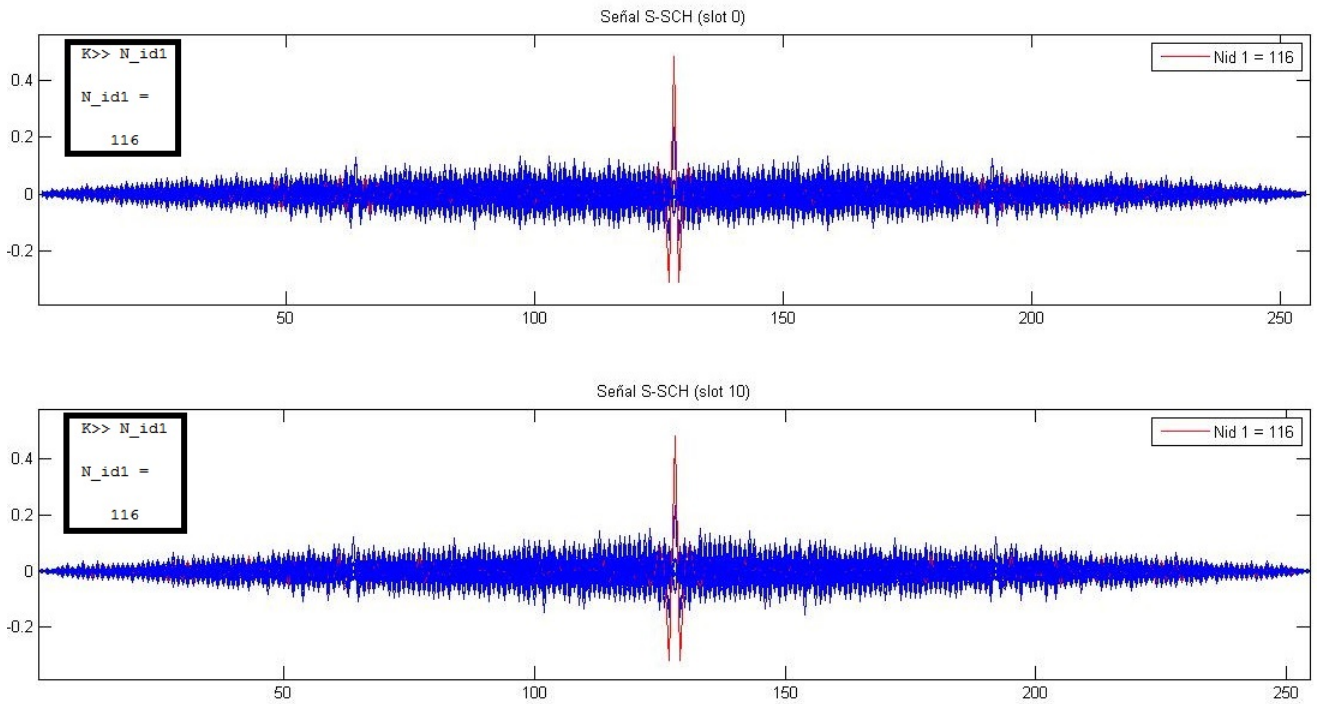


Figura 6.13: Detección del valor de N_{id}^1

Una vez que se ha detectado el valor correcto de N_{id}^1 , de forma análoga a lo comentado para N_{id}^2 , el receptor es capaz de detectar la posición en la cual se ha conseguido detectar dicho valor. Al contrario de lo que ocurre con **P-SCH**, para la señal **S-SCH** se generan dos secuencias diferentes una para el slot 0 y otra para el slot 10, gracias a esto el receptor es capaz de resolver la ambigüedad de slots resultante de la primera etapa del algoritmo y de esta forma consigue establecer la temporización de trama.

Por último, siguiendo la ecuación 5.9, el receptor es capaz de determinar cuál es el valor de N_{id}^{Cell} para de esta forma poder decodificar el canal Physical Broadcast Channel (Canal Físico de Broadcast) (**PBCH**), y así poder obtener el resto de parámetros del sistema necesarios para la conexión.

Gestión del Proyecto

En este capítulo se va a explicar de forma más detallada las fases en las que se ha dividido la gestión del actual proyecto y el tiempo aproximado para cada una de ellas

7.1. Fases del proyecto

En la tabla [7.1](#) se muestran cada una de las fases por las que ha ido pasando el proyecto.

Así pues, se desprende que el tiempo total dedicado por alumno al actual proyecto ha sido

<i>Fase 1</i>	<i>Estudio y documentación</i>	320horas
<i>Fase 2</i>	<i>Implementación del transmisor LTE</i>	120horas
<i>Fase 3</i>	<i>Implementación del receptor LTE</i>	120horas
<i>Fase 4</i>	<i>Redacción de la memoria</i>	240horas

Tabla 7.1: Fases del Proyecto

de 800 horas.

7.2. Tiempo de las Fases del proyecto

El presente proyecto se inició en el mes de Septiembre del año 2013 y con una duración total de 5 meses, finalizó en el mes de Enero del año 2014. En el siguiente diagrama de Gantt se detalla el tiempo dedicado a cada una de las etapas reflejadas en la tabla 7.1.

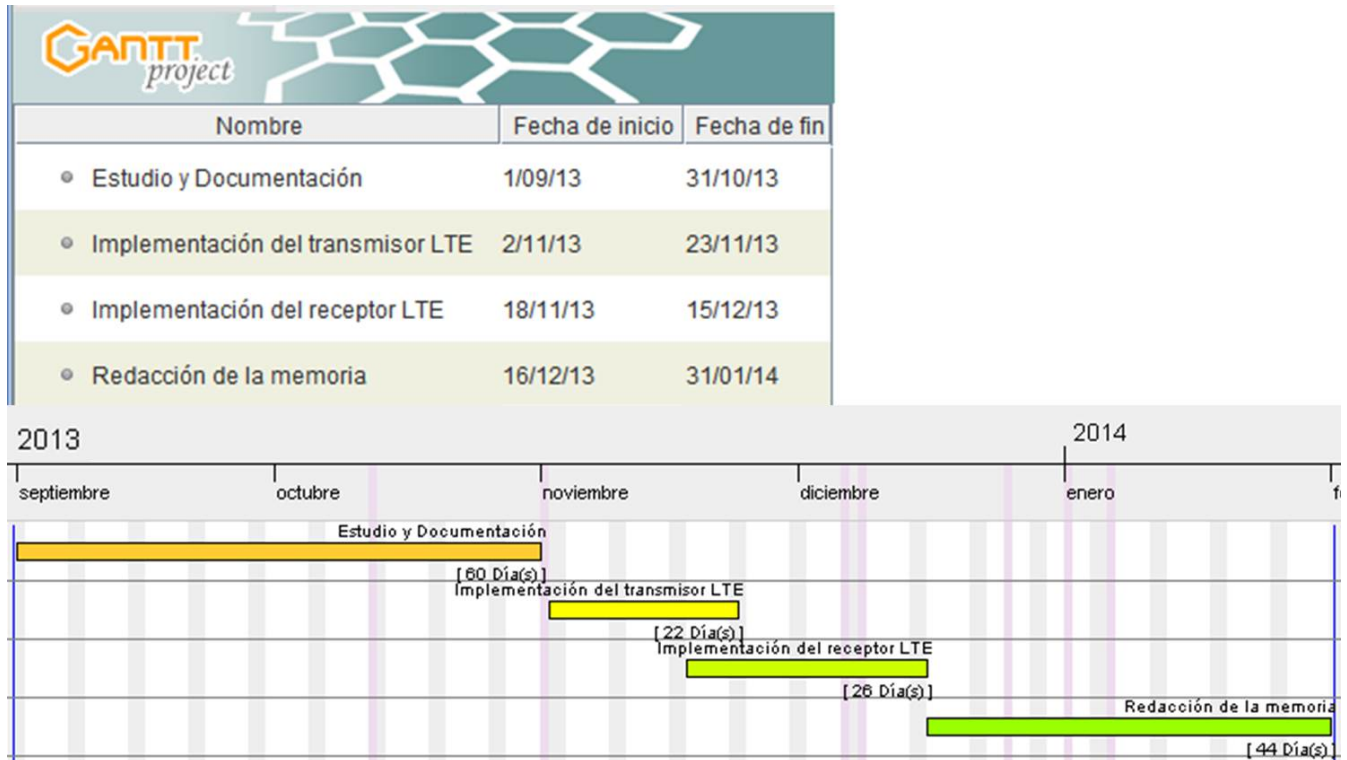


Figura 7.1: Diagrama de Gannt

Capítulo 8

Presupuesto Del Proyecto

En esta capítulo se va a determinar los costes totales de la realización del presente Proyecto Fin de Grado, se debe contabilizar tanto los costes de personal debidos a las personas que han intervenido en el desarrollo del mismo, como los costes materiales debidos tanto al material hardware como al material software empleado para la consecución del presente proyecto.

8.1. Costes de personal

El coste del personal viene asociado por el trabajo realizado por las diferentes personas que han intervenido de forma directa o indirecta en la realización del proyecto. Tomando como referencia que el sueldo bruto de un ingeniero junior de telecomunicaciones ronda actualmente los 26.000 €/año y el de un ingeniero senior de telecomunicaciones 52.000 €/año, y que la realización del presente proyecto ha empleado un tiempo aproximado de 5 meses con una media de 8 horas diarias (800 horas), el coste de personal asciende a:

Persona	Categoria	Salario Bruto(año)	NºHoras	Importe Total(€)
Gonzalo Martín-Viveros Tello	Ingeniero Junior	26.000€	800	10.833,33 €
Ana García Armada	Ingeniero Senior	52.000€	80	2.166 €
			Total	12.999,33 €

Tabla 8.1: Costes de Personal

8.2. Costes de material

En esta sección se recogen los costes de material separados entre software y hardware. También es necesario añadir gastos variados no atribuibles como son el material fungible, llamadas telefónicas, desplazamientos, etc...

A partir de estos datos los costes totales de material se muestran en las siguientes tablas.

Equipo	Importe(€)	Vida útil(meses)	Tiempo de uso(meses)	Coste(€)
Ordenador portátil LG	1.100	72	5	61,11

Tabla 8.2: Costes de Material Hardware

Material	Coste (€)
MATLAB Simulink Student Version R2013a	69
Adobe Reader XI	79,94
Documentación IEEE	157,876
Total	306,816 €

Tabla 8.3: Costes de Material Software

Material	Coste (€)
Material fungible (papel, bolígrafos, cartuchos de tinta..)	80
Desplazamientos	100
Otros gastos	50
Total	230 €

Tabla 8.4: Costes de Materiales variados no atribuibles

8.3. Costes Total de Proyecto

Por último, se muestra el coste total del proyecto añadiéndole los costes indirectos, los cuales son el 20 % de los costes directos para así poder mantener un margen de operación.

Concepto	Importe
Costes Personal	13.000€
Costes Material	597,93€
Costes indirectos(20 %)	2.719,45€
Base imponible	16.317,38€
I.V.A (21 %)	3.426,65€
TOTAL	19.745€

Tabla 8.5: Costes Total de Proyecto

El coste total del presente proyecto asciende a la cantidad de DIECINUEVE MIL SETECIENTOS CUARENTA Y CINCO EUROS (19.745€).

Capítulo 9

Conclusiones

En este capítulo se hará una breve descripción y una valoración crítica de las conclusiones extraídas del trabajo desarrollado durante la realización del presente proyecto fin de grado. Además, se detallarán las principales aportaciones realizadas por este proyecto al propósito global, evaluando el cumplimiento de los objetivos marcados. A continuación se sugerirán posibles ampliaciones y/o mejoras aplicables al proyecto desarrollado y finalmente se enumerarán las principales incidencias ocurridas durante el desarrollo del mismo.

9.1. Conclusiones Generales

El presente proyecto buscaba iniciar una línea de trabajo con la que poder estudiar y conocer los nuevos sistemas de comunicaciones de cuarta generación basados en tecnología OFDM que tan de moda están actualmente. Dentro del estudio de estos sistemas, el principal objetivo del trabajo era estudiar e implementar la etapa de búsqueda de celda y sincronización, esta etapa se considera de las más críticas ya que, es la primera que debe ejecutar un terminal que desea conectarse a la red LTE, para así ser capaz de obtener los parámetros necesarios para la transmisión y establecer la sincronización temporal con la estación base. Cabe destacar que este proyecto no incluye el sistema de comunicación completo, dejando los módulos restantes para futuras ampliaciones o mejoras del mismo.

En la primera parte del desarrollo del proyecto fue necesario el estudio de los conceptos relacionados con la transmisión de señales radio, conocer las principales características que tienen los sistemas OFDM y entender y comprender el estándar de LTE [1]. Una vez que se entendieron todos los conceptos y características de estos sistemas, se llevó a cabo la simulación de un transmisor LTE que genera tanto las señales de sincronización como las señales de referencia. Como se ha comentado en el capítulo 6, se ha conseguido comprobar la correcta implementación de estas señales gracias a la realización de diversas medidas como el PAPR o la autocorrelación de las mismas.

En la segunda parte del proyecto fue necesario el estudio y comprensión de los diferentes algoritmos que existen en la literatura para poder implementar las etapas de sincronización y búsqueda de la celda. Una vez estudiados todos, se optó por utilizar el algoritmo que tenía en cuenta el efecto de aproximadamente todos los parámetros de sincronización y a su vez la mayor simplicidad de hardware posible[6]. Como se ha comentado en el capítulo 6, se ha conseguido demostrar la correcta implementación de el algoritmo elegido gracias a la comparación de los valores detectados con los valores generados, como en el caso de N_{id}^1, N_{id}^2 y N_{id}^{Cell} .

A modo de resumen, se pueden extraer como principal conclusión que:

- La utilización del algoritmo de búsqueda de celda y sincronización propuesto por el presente proyecto es una alternativa viable desde el punto de vista técnico, ya que cuenta con una gran simplicidad hardware y a su vez con una baja probabilidad de error, lo que facilita la implementación en sistemas OFDMA futuros.

Por todo lo anterior nombrado, se considera que el actual proyecto cumple con todos los objetivos propuestos y por lo tanto, se considera como **satisfactorio** el resultado del mismo.

9.2. Dificultades

La curva de aprendizaje fue plana durante la primera mitad del desarrollo del proyecto debido a la escasa información disponible en lo referente a la sincronización de los sistemas de cuarta generación [LTE](#).

La primera dificultad con la que me he encontrado a la hora de realizar el presente trabajo fin de grado ha sido el entender y comprender el estándar de 3GPP TS 36.211 [1], ya que por norma general, este tipo de estándares utilizan un lenguaje muy ambiguo y algo confuso a la hora de definir las características del sistema.

En la definición de los parámetros, el estándar no llega a definir todos los necesarios para la implementación del sistema, esto hace que sea muy costoso el saber el valor exacto de algunos de estos parámetros y por tanto existen algunos parámetros del sistema que uno debe de inventar con cierto criterio o buscar por multitud de estándares. Además, la notación de las fórmulas matemáticas tampoco queda muy clara en algunas ocasiones, y para entender cómo implementar una simple secuencia de inicialización, requiere una gran concentración además de una gran complejidad software a la hora de implementarlo en código. Todo esto es debido a que [LTE](#) no es un estándar tan sólido como era [UMTS](#), y debido a que es un sistema relativamente nuevo y esta no será la versión definitiva deja muchos cabos sin atar.

Otra gran dificultad fue la peculiaridad que tiene el programar con [Matlab](#), ya que para este software no existe el valor 0, es decir, para numerar columnas de una matriz o por ejemplo realizar bucles *for*, he debido de tener mucho cuidado para generarlo tal cual se especifica en el estándar del 3GPP. Para el lector, quizás parezca una cosa pequeña e insignificante de importancia pero sin embargo, desde el punto de vista del desarrollo, es una de las grandes piedras que he debido de sortear para poder realizar el presente proyecto.

Finalmente cabe destacar que gracias a todas las dificultades anteriormente descritas que han surgido durante la realización del presente proyecto, he conseguido aprender mucho acerca de los nuevos sistemas de comunicaciones 4G así como he logrado mejorar bastante en mis conocimientos de programación basados en el software [Matlab](#).

9.3. Líneas futuras

En esta sección se plantearán las posibles mejoras o ampliaciones que se pueden llevar a cabo en el sistema diseñado en este proyecto.

- Diseñar los bloques de modulación y demodulación tanto en el transmisor como en el receptor respectivamente.
- Añadir las técnicas MIMO al sistema actual.
- Completar el sistema OFDM desarrollando los módulos restantes como por ejemplo, el control de ganancia automática (AGC), la adaptación de velocidad y o los mecanismos HARQ.
- Una vez completado el sistema OFDM, se podrá realizar estudios de calidad de la información evaluando la BER, la SNR y el control de ganancia. También se podrá caracterizar el medio de transmisión.
- Generar el actual código Matlab en lenguaje de alto nivel VHDL para poder implementar el sistema OFDM completo en un dispositivo SFF SDR de los que dispone el departamento, para poder llevar a cabo un estudio real del comportamiento del sistema.

Capítulo 10

Opinión Personal

Gracias a la posibilidad que se me ha brindado de poder llevar a cabo un trabajo de estudio de un sistema de comunicaciones móviles de cuarta generación, he logrado aumentar mis conocimientos acerca de las nuevas técnicas de modulación utilizadas actualmente en multitud de sistemas como son [OFDMA](#), cosa que me será de gran utilidad en posteriores proyectos.

Por otro lado, ha sido para mi una gran satisfacción haber podido aplicar y afianzar los diferentes conceptos adquiridos en las diferentes asignaturas cursadas durante la carrera como por ejemplo: Comunicaciones Digitales, Sistemas de Telecomunicación o Comunicaciones móviles entre otras.

En cuanto a experiencia personal, el presente proyecto me ha concedido la oportunidad de darme cuenta de cuanto realmente me gusta el mundo de las comunicaciones móviles y me ha abierto la puerta para poder continuar estudiando por esta rama.

Apéndices

MIMO (Multiple Input- Multiple Output)

El Multiple Input Multiple Output (Múltiples entradas Múltiples salidas) ([MIMO](#)) consiste en añadir diferentes antenas tanto al receptor como al transmisor de un mismo sistema, mediante esta técnica los sistemas multiantena consiguen aumentar su capacidad sin tener que incrementar la potencia ni el ancho de banda.

Los sistemas [MIMO](#) rompen el Teorema de Shannon (véase ecuación [A.1](#)), ya que según Shannon, para poder aumentar la capacidad de un sistema, debemos de aumentar el ancho de banda (B) o disminuir la relación señal a ruido¹, sin embargo, gracias al uso de los sistemas [MIMO](#), se consigue aumentar la capacidad del sistema en base al número de antenas. Los sistemas [MIMO](#) no sólo aumentan la capacidad, también incrementan el área de cobertura y reducen el Bit Error Rate (BER).

$$C = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \tag{A.1}$$

¹La relación señal a ruido (S/N) es la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido de fondo.

A.1. Tipos de Transmisión del Canal PDSCH (Modos MIMO en LTE)

El canal descendente **PDSCH** tiene diferentes modos de transmisión dependiendo del tipo de **MIMO** que deseemos utilizar en el sistema.

- Modo 1: Una sola antena de transmisión (SISO o SIMO) → Un solo puerto $p = 0$
- Modo 2: Diversidad de transmisión.
 - Varias antenas de transmisión (hasta 4).
- Modo 3: Multiplexado espacial en lazo abierto (OL-SM)
 - Transmisión de diferentes streams del mismo usuario simultáneamente.
 - Hasta 2 palabras código sin feedback del PMI.
 - El eNodeB decide cuántas antenas utiliza (2 o 4 antenas).
- Modo 4: Multiplexado espacial en lazo cerrado (CL-SM)
 - Transmisión de diferentes streams del mismo usuario simultáneamente.
 - Hasta 2 palabras código sin feedback del RI y PMI.
 - Puede utilizar 2 o 4 antenas.
 - **Maximiza el throughput de pico de usuario.**
- Modo 5: MIMO multiusuario (MU-MIMO)
 - Transmisión de diferentes streams de datos de usuarios diferentes dentro del mismo RB utilizando la dimensión espacial.
 - Solo una palabra código por usuario.
 - Hasta 4 antenas de transmisión.
 - **Maximiza el throughput de un sector.**
- Modo 6: Precodificación en lazo cerrado
 - Igual que el modo 4 pero con Rank=1.
 - No se necesita feedback del RI.

- Modo 7: 1 antena de transmisión; puerto 5 $\rightarrow p = 5$
 - Igual que el modo 1 pero utilizando las Señales de Referencia específicas de UE en lugar de las de celda, gracias a esto se ahorra en pilotos, se facilita el beamforming pero reduce las oportunidades de estimación de canal y reasignación.
 - Se utilizan más antenas en transmisión porque se hace beamforming, pero es como se recibiera desde una sola antena virtual.
- Modo 8: Doble Capa (Dual Layer); puertos 7 y 8 [Solo en Rel. 9]
 - Igual que el modo 7, pero ahora con dos capas(para uno o dos usuarios), así se combina beamforming con multiplexación espacial.

El tipo de transmisión se configura por medio del Radio Resource Control (RRC) de forma semi estática.

Sistema de Información

El conjunto de datos transmitidos desde el **eNB**, que informan a los diferentes terminales móviles de la configuración de la red LTE a la que quieren acceder, se los conoce como Información del Sistema (Information System) (**SI**).

Toda la **SI** se configura a partir de los diferentes tipos de System Information Blocks (Bloque de Información de Sistema) (**SIBs**) que son transmitidos por los diferentes canales físicos.

- **Physical Broadcast Channel (Canal Físico de Broadcast) (**PBCH**)**
 - **Master Information Block (Bloque Master de Información) (**MIB**)**: El **MIB** transmite parámetros fundamentales de la red para permitir el acceso inicial del terminal móvil a la misma como:
 - canalización utilizada
 - número de antenas en transmisión
 - número de trama
- **Physical Downlink Shared Channel (Canal compartido del Enlace físico descendente) (**PDSCH**)**
 - **System Information Blocks I (Bloque de Información de Sistema I) (**SIB1**)**: Este SIB transmite información relacionada con el acceso a la celda e información sobre asignación de recursos como:
 - La identidad del operador móvil (PLMN identity)

- El área de localización
 - La identidad de la celda
 - Mínimo nivel de recepción requerido
 - Ubicación (scheduling) de los restantes SIBs
 - En el caso de operar en modo [TDD](#) la configuración de la trama (ubicación de las subtramas del enlace ascendente y descendente).
- **System Information Blocks II (Bloque de Información de Sistema II) ([SIB2](#)):**
Se utiliza para informar al móvil de :
 - La configuración de los canales comunes y compartidos
 - Parámetros de acceso aleatorio
 - Ancho de banda y parámetros del control de potencia en el enlace ascendente.
 - **System Information Blocks III (Bloque de Información de Sistema III) ([SIB3](#)):** Se utiliza para informar al móvil de parámetros comunes relacionados con los mecanismos de re selección de celda, bien sea entre celdas que utilizan el mismo conjunto de subportadoras (intra-frequency reselection), bien sea entre celdas que utilizan distintas subportadoras (inter-frequency reselection).
 - **System Information Blocks IV (Bloque de Información de Sistema IV) ([SIB4](#)):** Se utiliza para informar al móvil de parámetros relacionados con la configuración de las celdas vecinas que utilizan las mismas subportadoras (intra-frequency cell reselection information). Esta información es necesaria para que el móvil posteriormente pueda realizar los procedimientos de transferencia de llamada (handover).
 - **System Information Blocks V (Bloque de Información de Sistema V) ([SIB5](#)):** Se utiliza para informar al móvil de parámetros relacionados con la configuración de las celdas vecinas que utilizan subportadoras distintas (interfrequency cell reselection information). Nuevamente esta información es necesaria para que el móvil posteriormente pueda realizar los procedimientos de transferencia de llamada (handover).
 - **System Information Blocks VI (Bloque de Información de Sistema VI) ([SIB6](#)):** Se utiliza para dar soporte a los mecanismos de re selección hacia celdas del sistema Universal Terrestrial Radio Access Network (Red Universal de Acceso Radio Terrestre) ([UTRAN](#)).

- **System Information Blocks VII**(Bloque de Información de Sistema VII) ([SIB7](#)): Se utiliza para dar soporte a los mecanismos de re selección hacia celdas del sistema GERAN.
- **System Information Blocks VIII**(Bloque de Información de Sistema VIII) ([SIB8](#)): Se utiliza para dar soporte a los mecanismos de re selección hacia celdas del sistema CDMA2000.
- **System Information Blocks IX**(Bloque de Información de Sistema IX) ([SIB9](#)): Contiene el identificador del eNB (eNB identifier). Permite al terminal móvil la opción de hacer una selección manual del eNB al que quiere conectarse.
- **System Information Blocks X**(Bloque de Información de Sistema X) ([SIB10](#)): Contiene notificaciones del denominado Earthquake and Tsunami Warning System⁵⁰ (Sistema de aviso de terremotos y Tsunami) ([ETWS](#)) [[5](#)].
- **System Information Blocks XI**(Bloque de Información de Sistema XI) ([SIB11](#)): Contiene notificaciones complementarias del [ETWS](#).

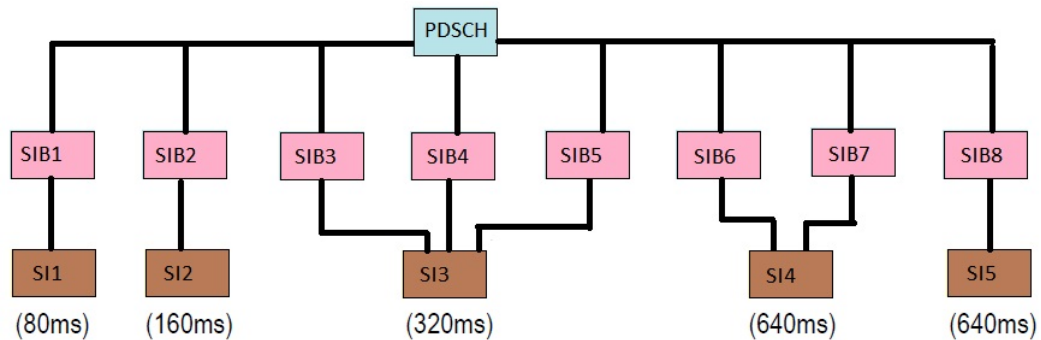


Figura B.1: *Mapeo entre SIBs y SI*[[13](#)]

Secuencias utilizadas en LTE

C.1. Secuencias de Zadoff-Chu

Las secuencias de Zadoff-Chu son secuencias de CAZAC (Secuencias de auto-correlación de amplitud cero constantes) no binarias y de amplitud unidad, además todas las secuencias de Zadoff-Chu tienen las siguientes propiedades:

- Función de autocorrelación cíclica nula excepto cuando están completamente alineadas, esta propiedad es especialmente buena para los sistemas LTE, ya que permite utilizar este tipo de secuencias para la correcta estimación del sincronismo temporal y la detección de las señales piloto.
- Desplazamientos cíclicos o circulares de una determinada secuencia dan lugar a nuevas secuencias ortogonales entre sí.
- La transformada de Fourier de una secuencia Zadoff-Chu es otra secuencia Zadoff-Chu ponderada y desplazada cíclicamente, esto quiere decir que, las secuencias de Zadoff-Chu pueden ser generadas tanto en tiempo como en frecuencia. Esta propiedad es muy importante para los sistemas [LTE](#) ya que, tiene numerosos procedimientos asociados a la capa física que necesitan operar en el dominio de la frecuencia y por lo tanto no es necesario recurrir a la Discrete Fourier Transform (Transformada Discreta de Fourier) ([DFT](#)) para generarlas.

C.2. Secuencias de tipo GOLD

Las secuencias tipo Gold son secuencias binarias que representan buenas propiedades de autocorrelación que se generan a partir de dos secuencias de máxima longitud elegidas de tal modo que su función de correlación cruzada sólo tiene tres posibles valores.

Las secuencias de tipo Gold tienen las siguientes propiedades:

- Una familia de códigos de Gold consiste en el conjunto de 2^{m+1} secuencias, cada una de ellas de longitud $2m - 1$.
- El producto base 2 de dos funciones de Gold de la misma familia es otra función de tipo Gold.
- Dada una familia de códigos de tipo Gold, aproximadamente la mitad de los valores serán +1 y la otra mitad serán valores -1, es decir, son códigos balanceados y su función de autocorrelación tendrá un valor de amplitud unidad.

C.3. Secuencias de Máxima Longitud (m-sequences)

Las secuencias de máxima longitud o m-sequences son secuencias binaria pseudo aleatorias, la denominación de máxima longitud significa que es el código de mayor longitud que se puede generar por medio de un registro de desplazamiento de longitud $2^m - 1$, es decir, $K = 0, 1, \dots, 2^m - 1$ chips de longitud (véase figura C.1).

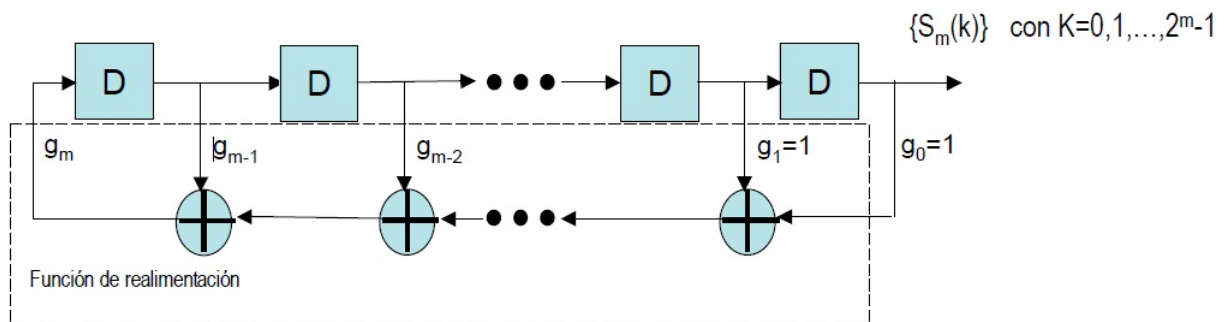


Figura C.1: Generador de secuencia de máxima longitud [13]

La función de realimentación se obtiene como suma módulo 2 de las salidas de ciertas etapas del registro de desplazamiento.

Propiedades de secuencias de longitud máxima(m-secuencias).

1. Dados N registros, el número de secuencias de longitud $2^m - 1$ es limitado.
2. Si una *m-secuencia* se suma en módulo 2 con una réplica de ella misma desplazada, la suma es otra réplica de la misma secuencia con otro desplazamiento.
3. Si m es suficientemente grande, se puede concluir que la función de autocorrelación de las *m-secuencias* se aproxima a una función de autocorrelación ideal caracterizada por una delta de Kronecker ($\delta(0)$).
4. **Correlación Parcial:** Cuando el período de una *m-secuencia* es muy largo comparado con la longitud del mensaje, se puede asumir independencia entre un elemento a_n y uno a_{n+t} , de forma que, el valor medio de la correlación parcial resulta ser igual a M para $t = 0, N, 2N, \dots$ y cero para el resto. Por otra parte la varianza de la correlación parcial resulta igual a 0 para $t = 0, N, 2N, \dots$ y resulta igual a M para el resto.
5. Cualquier m-secuencia contiene 2^{m-1} valores 1 y $2^{(m-1)} - 1$ valores 0, es decir, el número de valores 1 y valores 0 difieren en uno. Esto hace que su función de autocorrelación tenga un valor de amplitud unidad.

Bibliografía

Bibliografía

- [1] 3GPP TS 36.211 V12.0 RELEASE 12, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*, DIC. 2013
- [2] 3GPP TS 36.212 V12.0 RELEASE 12, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding*, DIC. 2013
- [3] 3GPP TS 36.213 V12.0 RELEASE 12, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*, DIC. 2013
- [4] 3GPP TS 36.104 V12.0 RELEASE 12, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception*, DIC. 2013
- [5] 3GPP TS 22.268 V12.0 RELEASE 12, *Public Warning System (PWS) Requirements*, JUN. 2013
- [6] ABDO N. GABER, LOAY D. KHALAF, AND AHMAD M. MUSTAFA. 2012., *Synchronization and cell search algorithms in 3GPP long term evolution systems (FDD mode)*., JOURNAL WSEAS TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS ARCHIVE VOLUME 11 ISSUE 2, FEBRUARY 2012 PAGES 70-81
- [7] KONSTANTINOS MANOLAKIS, DAVID MANUEL GUTIÉRREZ ESTÉVEZ, VOLKER JUNGNICHEL, WEN XU, CHRISTIAN DREWES, FRAUNHOFER INSTITUTE FOR TELECOMMUNICATIONS, BERLIN, GERMANY, *A Closed Concept for Synchronization and Cell Search in 3GPP LTE Systems*, WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2009. WCNC 2009, IEEE, PP.1-6, 5-8 APRIL 2009

- [8] JUNG-IN KIM, JUNG-SU HAN, HEE-JIN ROH AND HYUNG-JIN CHOI. SCHOOL OF INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERING SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY, SUWON, KOREA, *SSS Detection Method for Initial Cell Search in 3GPP LTE FDD/TDD Dual Mode Receiver*, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY, 2009, PP.199-203
- [9] Y.TSAI, G.ZHANG, D.GRIECO, F.OZLUTURK, *Cell Search in 3GPP Long Term Evolution Systems*, IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY MAGAZINE, VOL.2, PP.23-29, JUNIO 2007
- [10] BRIAN KATUMBA, JOHANNES LINDGREN AND KATERYNA MARIUSHKINA, DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING AND DEPARTMENT OF SIGNALS AND SYSTEM CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, SWEDEN, *The LTE Access Procedure*, Mayo 2011
- [11] F. JAVIER LÓPEZ MARTÍNEZ, EDUARDO MARTOS NAYA, J. TOMÁS ENTRAMBASAGUAS. DPTO. DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES, UNIVERSIDAD DE MÁLAGA, *Análisis y evaluación de algoritmos para los procedimientos de sincronización en 3GPP-LTE*, DIGITAL SIGNAL PROCESSING, VOL.22, ISSUE 3, PP.526-534, MAYO 2012.
- [12] COMUNICACIONES MÓVILES, *Evolucion de los Sistemas 3G*, RAQUEL PÉREZ LEAL, DPTO. DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, CURSO 2012/2013
- [13] LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES, *Coor. Ramón Agustí, varios autores. 2010 Fundación Vodafone*
- [14] PFC: AUTOR: Kun Chen, TUTORA: Ana García Armada, DPTO. DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, 2012, *ESTUDIO DE LA MODULACIÓN SC-FDMA E IMPLEMENTACIÓN EN UN DISPOSITIVO SFF SDR*
- [15] PÁGINA WEB:, *InformaticaHoy*, DISPONIBLE EN:, <http://www.informatica-hoy.com.ar/telefonos-celulares/La-historia-del-Telefono-Celular.php> (último acceso, Enero 2014)
- [16] MATLAB, THE LANGUAGE OF TECHNICAL COMPUTING, v.7.10, MARZ. 5, 2010, *MathWorks* <http://www.mathworks.es/products/matlab/> (último acceso, Enero 2014)

-
- [17] L^AT_EX, *Disponible en:* <http://www.latex-project.org/>; (último acceso, Enero 2014)